

Vliv technologie dělení materiálů na jejich povrchové vlastnosti

Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Teze disertační práce

**Vliv technologie dělení materiálů
na jejich povrchové vlastnosti**

**Influence of the material cutting technology
on their surface properties**

Autor: Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D.

Studijní program: P3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.

Konzultanti: Ing. Martin Ovsík, Ph.D.
Ing. Aleš Mizera, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Ivan Hudec, Ph.D.
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld, FEng.
prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.

Zlín, červen 2019

© Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D.

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2019

Klíčová slova: nanotvrdost, instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI, mechanické vlastnosti, drsnost, řezání laserem, řezání vodním paprskem, řezání plazmou, elektroerozivní drátové řezání

Key words: nanohardness, depth sensing indentation, mechanical properties, roughness, laser cutting, water jet cutting, plasma cutting, electrical discharge machining

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-851-2

ABSTRAKT

Dělení materiálů představují technologie, které v poslední době zaznamenaly velký rozmach. Bylo to zejména v důsledku rostoucích nároků na přesnost operací a efektivitu celého procesu dělení. Mechanické způsoby dělení, třískové i beztrískové, jsou známé dlouhou dobu. Tyto způsoby však mají své limity, ve většině případů umožňují jen přímé řezy. Nové technologie, označované jako technologie nekonvenční, zahrnující např. dělení pomocí laseru, plazmy nebo vodního paprsku, umožňují realizovat řezy složitých tvarů, velkou rychlostí a s poměrně vysokou přesností. V mnoha případech, zejména u plošných materiálů menších tloušťek, nevyžadují vytvořené díly žádnou další úpravu dodatečným obráběním. Kromě řezání 2D složitých tvarů, umožňují nové metody i velmi komplikované řezy 3D charakteru. S ohledem na rychlost řezu představují tyto metody významný kvalitativní i kvantitativní pokrok.

K posouzení vhodnosti použití konvenčních metod pro různé aplikace je nutná znalost doprovodných jevů zahrnujících zejména ovlivnění vlastností řezaného materiálu v okolí řezu a jakost řezných ploch. Studium uvedených jevů je jedním ze stěžejních cílů zpracování dizertační práce.

Klíčové slova: nanotvrdost, instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI, mechanické vlastnosti, drsnost, řezání laserem, řezání vodním paprskem, řezání plazmou, elektroerozivní drátové řezání

ABSTRACT

Material splitting is a technology that has recently been booming. This was mainly due to the growing demands on the accuracy of operations and the efficiency of the entire division process. Mechanical methods of cutting, both chip and non-chip, are known for a long time. However, these methods have their limits – in most cases they only allow straight cuts. New technologies, referred to as unconventional technologies, including laser, plasma, or water jet cutting, make it possible to realize slices of complex shapes, at high speeds and with relatively high precision. In many cases, especially in the case of thinner materials, the produced parts do not require any further machining. In addition to 2D cutting intricate shapes, new methods allow even very complex 3D character cuts. With regard to cutting speed, these methods represent significant qualitative and quantitative advances.

In order to assess the suitability of using unconventional methods for different applications, it is necessary to know the accompanying phenomena, including in particular the influence of material properties near the cutting line and the quality of the cutting surfaces. The study of these phenomena is one of the main goals of the dissertation work.

Keywords: nanohardness, depth sensing indentation, mechanical properties, roughness, laser cutting, water jet cutting, plasma cutting, electrical discharge machining

OBSAH PRÁCE

SEZNAM ILUSTRACÍ.....	6
SEZNAM TABULEK.....	6
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK.....	7
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	9
1.1 DĚLENÍ MATERIÁLU.....	9
1.1.1 Nekonvenční způsoby dělení materiálu.....	9
1.1.1.1 Řezání materiálu laserem.....	11
1.1.1.2 Řezání materiálu plazmou.....	12
1.1.1.3 Řezání materiálu vodním paprskem.....	13
1.1.1.4 Elektroerozivní drátové řezání.....	15
1.2 TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST.....	16
2 CÍL PRÁCE.....	17
3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	17
3.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	18
3.1.1 Výběr vhodných typů ocelí.....	18
3.1.2 Stanovení geometrie zkušebního tělesa.....	18
3.1.3 Volba metod dělení materiálů.....	19
3.1.4 Výroba zkušebních těles.....	19
3.1.4.1 Řezání laserem.....	20
3.1.4.2 Řezání plazmou.....	20
3.1.4.3 Řezání vodním paprsek s abrazivem.....	20
3.1.4.4 Elektroerozivní drátové řezání.....	21
3.1.5 Příprava metalografických vzorků a výbrusů.....	21
3.2 MĚŘENÍ DEFINOVANÝCH VLASTNOSTÍ.....	22
3.2.1 Měření tvrdosti TOO.....	22
3.2.2 Optická analýza struktury TOO a základního materiálu.....	26
3.2.3 Měření drsnosti řezných ploch.....	26
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE.....	27
4.1 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI A PREDIKCE ROZMĚRŮ TOO.....	28
4.1.1 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260).....	29
4.1.1.1 Řezání laserem.....	29
4.1.1.2 Řezání plazmou.....	30
4.1.1.3 Elektroerozivní drátové řezání.....	31
4.1.1.4 Řezání vodním paprskem.....	32
4.2 OPTICKÁ ANALÝZA STRUKTURY TOO A ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU....	34
4.2.1 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260).....	34
4.2.1.1 Určení velikosti TOO při řezání laserem.....	35

4.3	VYHODNOCENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH PLOCH.....	36
4.3.1	Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)	37
4.3.1.1	Řezání laserem	37
4.3.1.2	Řezání plazmou	37
4.3.1.3	Elektroerozivní drátové řezání	37
4.3.1.4	Řezání vodním paprskem	38
5	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	38
6	ZÁVĚR.....	39
	LITERATURA	41
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	44
	CV AUTORA.....	46

SEZNAM ILUSTRACÍ

<i>Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění</i>	10
<i>Obr. 2 Princip řezání laserem</i>	11
<i>Obr. 3 Princip řezání plazmou</i>	13
<i>Obr. 4 Princip řezání vodním paprskem s abrazivem</i>	14
<i>Obr. 5 Princip elektroerozivního drátového řezání</i>	15
<i>Obr. 6 Rozměr zkušebního tělesa</i>	19
<i>Obr. 7 Schéma vnitřní struktury zkušebního tělesa</i>	22
<i>Obr. 8 Definice minimální vzdálenosti dvou sousedních vtisků</i>	23
<i>Obr. 9 Schéma měření indentační tvrdosti</i>	24
<i>Obr. 10 Konstrukční řešení vyhledávání povrchu vzorku při měření DSI</i>	24
<i>Obr. 11: Znázornění podbroušené plochy</i>	25
<i>Obr. 12 Ukázka maticového měření a detail indentu</i>	25
<i>Obr. 13 Vliv tloušťky zkušebního tělesa na vlastnosti TOO – ocel 1.0533</i>	28
<i>Obr. 14 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.7102</i>	29
<i>Obr. 15 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení laserem</i>	29
<i>Obr. 16 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.7102</i>	30
<i>Obr. 17 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení plazmou</i>	30
<i>Obr. 18 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.7102</i>	31
<i>Obr. 19 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po elektroer. drátovém řezání</i>	31
<i>Obr. 20 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.7102</i>	32
<i>Obr. 21 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení vodním paprskem</i>	32
<i>Obr. 22 Porovnání vlivu technologií dělení na TOO – ocel 1.7102</i>	33
<i>Obr. 23 Feriticko-perlitická struktura základního materiálu 1.7102</i>	34
<i>Obr. 24 Měření rozměrů TOO při řezání laserem – ocel 1.7102</i>	35
<i>Obr. 25 Schéma měření drsnosti na zkušebním tělese</i>	36
<i>Obr. 26 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez laserem</i>	37
<i>Obr. 27 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez plazmou</i>	37
<i>Obr. 28 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, el. drát. řezání</i>	37
<i>Obr. 29 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez vodním paprskem</i>	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.0553	18
Tab. 2 Chemické složení oceli 1.7102	18
Tab. 3 Chemické složení oceli 1.4301	18
Tab. 4 Procesní parametry při řezání laserem	20
Tab. 5 Procesní parametry při řezání plazmou	20
Tab. 6 Procesní parametry při řezání vodním paprskem s abrazivem	21
Tab. 7 Procesní parametry při elektroerozivním drátovém řezání	21
Tab. 8 Rozměry TOO při řezání oceli 1.7102 laserem	35

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

a	zatěžovací stupeň (Brinell)
ADO	Adjust Depth Offset
AWJ	Abrasive Water Jet
C	materiálový a geometrický koeficient indentoru
CNC	Computer Numerical Control (počítačově řízený)
d_1, d_2	průměr vtisku (Brinell) délka uhlopříčky (Vickers)
d_s	střední průměr vtisku (Brinell) střední úhlopříčka (Vickers)
D_{pr}	průměr průmětné kružnice (sférický indentoru)
DSI	Depth Sensing Indentation
E	modul pružnosti
E_{ind}	modul pružnosti indentoru
E_{mat}	modul pružnosti zkušebního tělesa
E_{red}	redukovaný modul pružnosti
F	zátěžná síla indentoru
F0	předběžné zatížení při Rockwellově zkoušce
F1	přídavné zatížení při Rockwellově zkoušce
F_{max}	maximální zatěžovací síly indentoru
h_a	výška od plochy zkušebního tělesa k místu kontaktu
h_e	elastická hloubka vtisku (elasticko-plastický kontakt)
h_{ep}	přechodová hloubka vtisku (elasticko-plastický kontakt)
h_{rez}	zbytková hloubka vtisku (elasticko-plastický kontakt)
h_{kont}	výška místa kontaktu
h_{max}	maximální hloubka vtisku
h_p	aktuální hloubka vtisku (výpočet průmětné plochy)
H	číslo tvrdosti
HB	Brinellova tvrdost
HR	Rockwellova tvrdost
HV	Vickersova tvrdost

k	Konstanta úměrnosti
KHN	Knoopovo číslo tvrdosti
ln	vyhodnocovací délka drsnosti
lr	základní délka drsnosti
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
n	Meyerův index
p_{sk}	střední kontaktní tlak
R	relativní poloměr
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu
R_{ind}	poloměr indentoru
R_p	největší výška výstupků profilu drsnosti
R_v	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
R_z	Největší výška profilu drsnosti
r_{kont}	kontaktní poloměr
R_e	smluvní mez kluzu materiálu
S_{pr}	průměrná plocha vtisku indentoru
S_{skut}	skutečná plocha vtisku indentoru
SW	software
TOO	tepelně ovlivněná oblast
WJM	Water Jet Machining
Z_p	výšky nejvyššího výstupku profilu
Z_v	hloubky nejnižší prohlubně profilu
α	vrcholový polo-úhel kuželového indentoru
ε	poměrné délkové prodloužení
σ	mechanické napětí
μ	Poissonovo číslo
μ_{ind}	Poissonovo číslo indentoru
μ_{mat}	Poissonovo číslo zkušebního tělesa
χ	koeficient zpevnění kovu
θ	vrcholový polo-úhel pyramidálního indentoru

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Dělení materiálů představují technologie, které v poslední době zaznamenaly velký rozmach. Bylo to zejména v důsledku rostoucích nároků na přesnost operací a efektivitu celého procesu dělení. Mechanické způsoby dělení, třískové i beztřískové, jsou známé dlouhou dobu. Tyto způsoby však mají své limity, ve většině případů umožňují jen přímé řezy. Nové technologie, označované jako technologie nekonvenční, zahrnující např. dělení pomocí laseru, plazmy nebo vodního paprsku, umožňují realizovat řezy složitých tvarů, velkou rychlostí a s poměrně vysokou přesností. V mnoha případech, zejména u plošných materiálů menších tloušťek, nevyžadují vytvořené díly žádnou další úpravu dodatečným obráběním. Kromě řezání 2D složitých tvarů, umožňují nové metody i velmi komplikované řezy 3D charakteru. S ohledem na rychlost řezu představují tyto metody významný kvalitativní i kvantitativní pokrok.

K posouzení vhodnosti použití konvenčních metod pro různé aplikace je nutná znalost doprovodných jevů zahrnujících zejména ovlivnění vlastností řezaného materiálu v okolí řezu a jakost rezných ploch. Studium uvedených jevů je jedním ze stěžejních cílů dizertační práce.

1.1 Dělení materiálu

Dělení materiálů, zejména plošných útvarů jako plechy či desky, je v průmyslové praxi častým případem zahrnutým již do operací přípravy materiálu. S ohledem na značný rozsah zastoupení těchto operací ve výrobních procesech rostou tlaky na snižování nákladů, zvyšování produktivity při dodržení požadované přesnosti a kvality zhotovovaných polotovarů či přímo hotových výrobků.

Klasické metody dělení, založené na třískových (řezání) či beztřískových (stříhání) metodách jsou velmi dobře známé a popsány. Tyto metody se v průmyslové praxi označují jako konvenční. Aplikovatelnost těchto metod je však omezena pouze na přímé řezy, což v mnoha případech, zejména u tvarově složitých dílů, vylučuje jejich použitelnost. Některé materiály s horší obrobitelností těmito metodami nelze dělit vůbec. Zmíněné limitující faktory vedly k vývoji nekonvenčních metod obrábění využívaných i v procesu dělení materiálů. [1][2][3]

V této práci budou podrobněji rozebrány pouze nekonvenční metody dělení materiálu. Cíle práce jsou totiž orientovány na zkoumání vlivu těchto metod, především pak metod využívajících tepelných principů.

1.1.1 Nekonvenční způsoby dělení materiálu

Nekonvenční metody dělení materiálu využívají k odstranění materiálu z místa řezu, na rozdíl od konvenčních metod, fyzikálních, chemických nebo mechanických dějů či jejich kombinovaných účinků. Patří sem např. řezání laserem, plazmou nebo vodním paprskem či elektroerozivní drátové řezání.

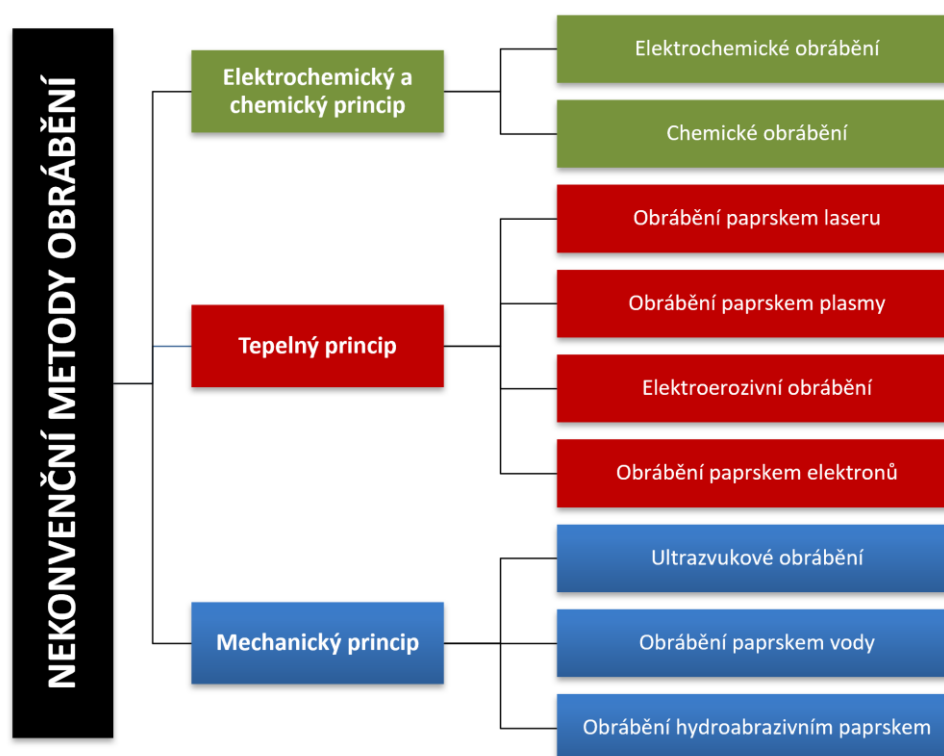
I přes řadu nevýhod je doposud velmi často používáno i dělení materiálu kyslíkem, zejména u plechů a desek větších tlouštěk. Ačkoliv má tato metoda na řezaný materiál pravděpodobně největší tepelný účinek ze všech výše uvedených, není řezání kyslíkem řazeno mezi nekonvenční metody dělení materiálu a jeho vliv na místo řezu nebude v práci dále rozebírán. [4][5][5]

Obrovskou výhodou nekonvenčních metod je velká flexibilita a možnost plné automatizace těchto procesů. Užití nekonvenčních technologií umožňuje výrobu tvarově složitých 2D i 3D dílů. Rychlost a výkonnost těchto technologií často nezávisí na mechanických vlastnostech děleného materiálu, lze obrábět materiály s velkou pevností či tvrdostí. Tyto technologie jsou dnes široce využívány v celé řadě aplikací a nacházejí v průmyslové praxi stále větší uplatnění. [1][2]

Z hlediska dělení materiálu mají největší význam metody využívající tepelné a mechanické principy. Výběr technologie dělení kovových materiálů závisí na jejich druhu a použitých procesních podmínkách, které lze optimalizovat buď dle zkušeností obsluhy, nebo pomocí speciálních výpočetních programů, které dokáží velice přesně vyhodnotit vhodnost materiálů pro danou technologii včetně optimálních podmínek řezání. [6][7]

S ohledem na charakter procesu, zejména v případě použití vysoce výkonných tepelných zdrojů (laser, plazma), je nutné zejména kvůli následujícím pracovním operacím zohlednit doprovodné jevy, které mohou ovlivňovat vlastnosti děleného materiálu zejména v okolí místa řezu. [2][7][8]

Rozdělení nekonvenčních metod podle principu je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2]

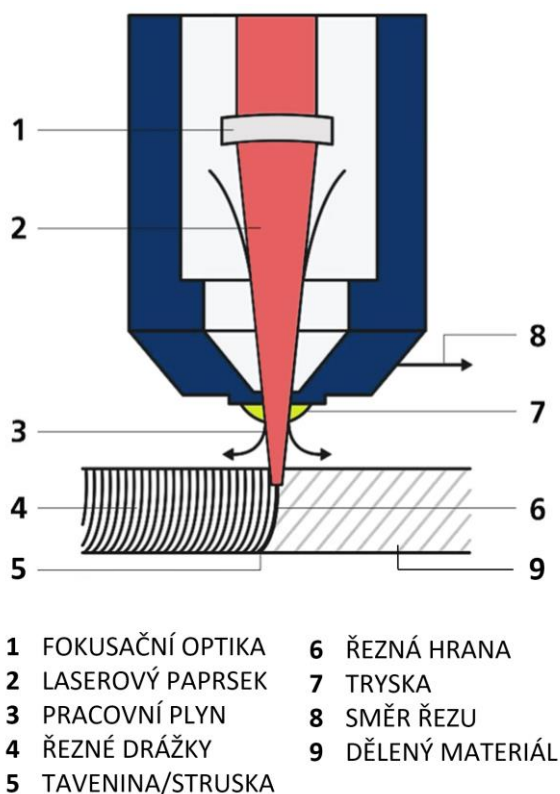
1.1.1.1 Řezání materiálu laserem

Slovo LASER je akronym vycházející z anglického označení Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což znamená zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Za laser je obecně pokládán světelný zdroj, který generuje světlo pouze s jednou vlnovou délkou. [2][9][10]

Laser je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie pro excitaci aktivního prostředí. Zdrojem energie je do aktivního prostředí dodávána energie, která energeticky vybudí elektrony aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny. Do vyšších energetických stavů je postupně vybudena většina elektronů aktivního prostředí, čímž dochází k tzv. inverzi populace. Při opětovném přestupu elektronu na nižší energetickou hladinu dojde k emisi množství energie ve formě fotonů. Tyto fotony následně interagují s dalšími elektrony inverzní populace, čímž vyvolají tzv. stimulovanou emisi fotonů. [9][10]

Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, tvořeného například soustavou zrcadel, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu aktivním prostředím. Tím je dále podporována stimulovaná emise a dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný světelný svazek pak opouští rezonátor průchodem skrze výstupní polopropustné zrcadlo. [9][10]

Řezání laserem je termická metoda dělení materiálu, při které laserový paprsek slouží jako dělicí nástroj. Princip této metody je znázorněn na Obr. 2.



Obr. 2 Princip řezání laserem [10]

Princip řezání laserem spočívá v přívodu vysoce koncentrované energie laserového svazku do místa řezu. Světelný svazek opouštějící rezonátor je následně zaostřen soustavou čoček do ohniska, ve kterém je dosahovaná hustota energie více než $10^7 - 10^8 \text{ W.cm}^{-2}$. [9][10]

Dnešní lasery jsou schopny pracovat s velkou přesností jak při řezání polovodičových čipů s šířkou řezu několik mikrometrů, tak při dělení ocelových plechů o tloušťce až 30 mm. Při řezání laserem není podstatná tvrdost materiálu, ale jeho tepelné a optické vlastnosti. Použitím povlaků lze dosáhnout lepších absorpčních schopností obráběného materiálu. Na absorpční schopnosti materiálu má také vliv kvalita a jakost povrchu. Povrchy s vyšší drsností absorbují energii rychleji než povrchy s nízkou drsností. [7][14][16][17]

Laserové řezání je fyzikálně poměrně komplikovaný proces, jehož složitost stoupá se zvyšující se tloušťkou řezaného materiálu, protože roste nepřesnost řezání, zvětšuje se šířka řezné štěrbin, velikost tepelně ovlivněné oblasti a rovněž jakost řezné plochy. Pro každý materiál je nutné nastavit optimální řezné parametry. Od určité tloušťky již není možné nastavit vhodnou kombinaci řezných parametrů vedoucí k uspokojivé kvalitě řezu. [18][19][20][21][22]

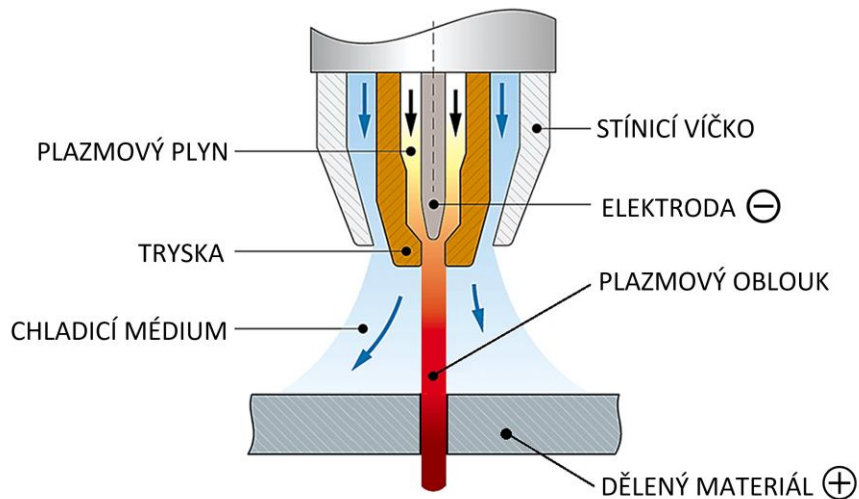
Řezání laserem je relativně tichá technologie, která neprodukuje téměř žádný odpad. Ze stroje je ovšem nutné zajistit odvod vznikajících kouřových zplodin. Jakmile laserový paprsek dopadne na povrch plechu, ohřeje materiál natolik, že se materiál v místě řezu začne tavit nebo přímo vypařovat. Proces řezání je zahájen, jakmile laserový paprsek propálí celou tloušťku plechu a začne se plynule pohybovat podél obrysů řezané součásti. [22]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [23][24][25]

1.1.1.2 Řezání materiálu plazmou

Fyzikální pojem plazma zavedl v roce 1932 americký fyzik a chemik Irving Langmuir pro speciální stav plynů, který je často označován jako čtvrtý stav hmoty. Obecně lze plazmatického stavu dosáhnout několika způsoby – zvýšením teploty, zvýšením tlaku nebo elektrickým výbojem. V technické praxi je k dosažení plazmatického stavu využíváno elektrických výbojů. [34][35]

Při ionizaci, která je nutná pro vznik plazmy, dochází v plynu k uvolňování valenčních elektronů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a v plazmě vedou elektrický proud. Ionizované jádro atomu má kladný náboj. Navenek je však plazma elektricky neutrální. [34][35]

Princip řezání plazmou je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. Úplné ionizace je dosaženo při teplotě kolem 100 000 K. Při svařování a řezání jsou dosahované teploty podstatně nižší, protože plazma je ionizována jen částečně. Neionizovaná část plynu je chladnější a stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky. [34][35]



Obr. 3 Princip řezání plazmou [34][35]

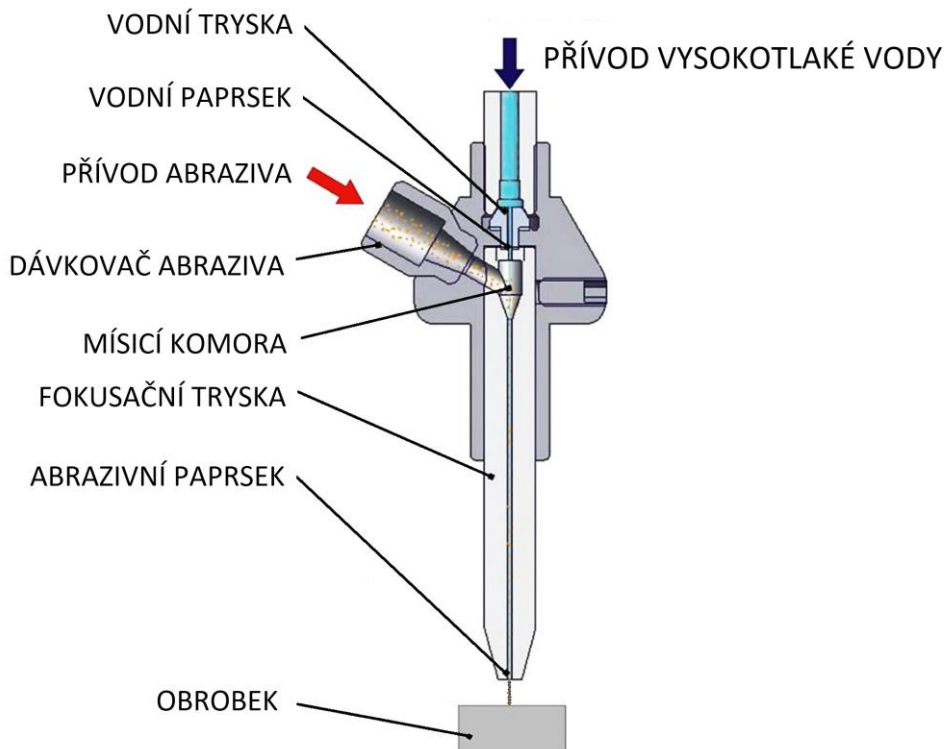
Princip plazmového řezání je znázorněn na Obr. 3. Vlivem dopadajícího paprsku s vysokou hustotou energie na povrch děleného materiálu dochází k jeho natavení. K vyfouknutí nataveného materiálu z řezné spáry je využita dynamika plazmového paprsku. Ke zvýšení koncentrace energie plazmového oblouku jsou používány chlazené plazmové hořáky, umožňující přívod fokusačního a ochranného (asistenčního) plynu, případně vody. Zvýšení koncentrace energie má za následek výrazné zvýšení výkonu. Asistenční plyn obklopuje plazmový elektrický oblouk, čímž chrání vytvářené řezné hrany před působením okolní atmosféry. [34][35]

Při řezání je výstupní rychlost plazmy 1 500 až 2 300 m.s⁻¹. Vysoká teplota plazmového paprsku umožňuje řezat všechny kovové materiály bez ohledu na jejich řezatelnost kyslíkem. Rychlost posuvu při řezání je závislá na výkonu zdroje a tloušťce a fyzikálních vlastnostech děleného materiálu. Maximální tloušťka materiálu, kterou lze plazmou řezat, je 250 mm. Nejčastější využití v průmyslové praxi však nachází plazma při řezání plechů s tloušťkou do 25mm. [34][35]

V současné době se plazmové řezání stalo univerzálním způsobem dělení pro širokou škálu kovových i nekovových materiálů. Během posledních dvaceti let především díky vysoké rychlosti řezání, schopnosti řezat neželezné kovy a podstatně menšímu tepelnému ovlivnění v místě řezu dramaticky vzrostlo uplatnění plazmy pro řezání na úkor řezání kyslíkem. [34][35]

1.1.1.3 Řezání materiálu vodním paprskem

Princip řezání vodním paprskem je znázorněn na Obr. 4. K dělení materiálu je využívána kinetická energie vysokotlakého vodního paprsku vystupujícího z trysky dvoj- až čtyřnásobnou rychlostí, než je rychlost zvuku (600 – 1 200 m/s). V případě, že jsou ve vodním paprsku obsaženy i abrazivní částice, je využívána rovněž kinetická energie těchto částic. [36]



Obr. 4 Princip řezání vodním paprskem s abrazivem [39]

Při řezání materiálu dochází k vysokorychlostnímu erozivnímu procesu – v místě průniku paprsku do materiálu dochází k obrušování materiálu abrazivními částicemi obsaženými v kapalném médiu. [36]

Řezný proces probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny na materiál prohlubeň, která se mění v otvor. V druhé etapě dochází k prohlubování tohoto otvoru a k vytvoření řezné spáry. Při nárazu paprsku kapaliny na povrch řezaného materiálu dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše. Tím dochází v řezaném materiálu k rázovým vlnám, rychlé destrukci materiálu na hranici zrn a ke vzniku mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří, čímž dochází k odebrání materiálu. Destrukce a odběr materiálu při řezání jsou rovněž způsobovány turbulentním prouděním kapaliny ve spáře a kavitačními bublinami. Pro řezání kovů, keramiky aj. se do paprsku kapaliny přidává abrazivum, což výše popsané účinky vodního paprsku ještě pozitivně ovlivňuje. [1][9][39]

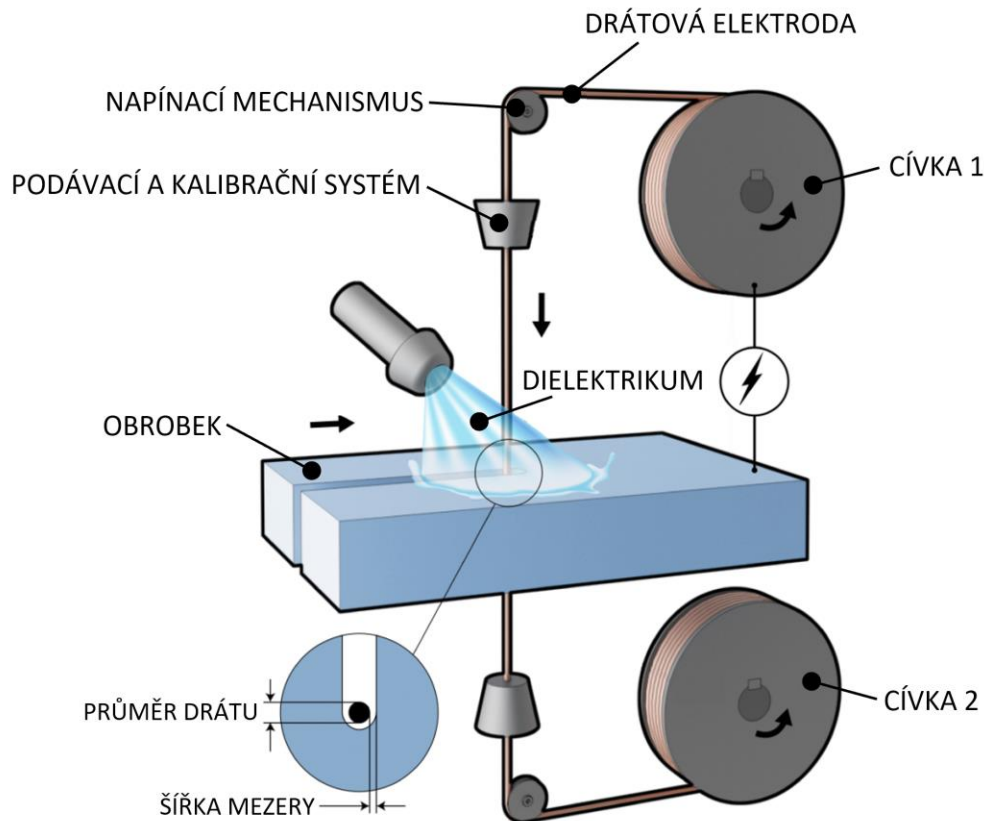
Odběr částic řezaného materiálu se dá považovat za mikro-rozměrový a dochází k němu prakticky za nezvýšené teploty. Šířka řezné spáry je jen o něco málo větší, než je průměr trysky. U obou metod (WJM i AWJ) dochází pouze k minimálnímu ovlivnění struktury v místě řezu a k minimálnímu zvýšení teploty – nedochází tak téměř k žádnému tepelnému ovlivnění materiálu a vzniku vnitřních napětí, jako je tomu např. při řezání plazmou nebo laserem. V místě působení vodního paprsku vzniká množství drobných jisker, v důsledku čehož dochází k nepatrnému odpařování vody. Vlivem přeměny části kinetické energie částic na

energii tepelnou zde dochází k lokálnímu zvýšení teploty o cca 20-30 °C. Velikost přeměněné části energie se však dá určit jen velmi obtížně. [36]

Díky skutečnosti, že nedochází k výraznému tepelnému ovlivnění v místě řezu, je možné řezat i materiály, které jinými metodami dělit nelze. Pro některé materiály však může i toto zvýšení teploty v místě řezu znamenat zhoršení vlastností, což může vést ke znehodnocení celého dílu. [36]

1.1.1.4 Elektroerozivní drátové řezání

Princip elektroerozivního drátového řezání je znázorněn na Obr. 5. Nástrojová elektroda je tvořena tenkým drátem, který je kvůli eliminaci opotřebení převíjen z jedné cívky na druhou. Mezi drátovou elektrodou a obrobkem vzniká vlivem elektroerozivních mechanismů pracovní mezera a řez požadovaného tvaru. Pro docílení přesného řezu a stability řezného procesu je nutné, aby drátová elektroda vstupovala do místa řezu řádně napnutá a vyrovnaná. Před vstupem drátové elektrody do pracovní zóny dochází ke kalibraci v diamantovém průvzlaku. [2][9]



Obr. 5 Princip elektroerozivního drátového řezání [39]

Mezi drátovou elektrodou a obrobkem dochází ke vzniku periodicky se opakujících mikro-výbojů. V místě elektrického výboje se materiál na povrchu obrobku prudce ohřívá, taví a částečně odpařuje. Zbylé produkty elektroeroze jsou z mezery mezi nástrojem a obrobkem vyplavovány proudem dielektrické kapaliny. Výboj mezi elektrodami vytváří na povrchu velké množství nepravidelných

kráterů, jejichž rozměry jsou závislé na použitém dielektriku, materiálu elektrody a pracovních podmínkách. Vznik těchto kráterů je doprovázen lokálním natavováním povrchu, vznikem tepelně ovlivněné vrstvy a plastickou deformací kráteru i jeho okolí. [2][9]

Účinkem vysokých teplot (8 000 - 12 000 °C) při elektroerozivním řezání dochází ke vzniku stabilní austenitické vrstvy, která je však téměř okamžitě ochlazována dielektrickou kapalinou a zakalena. Vlivem těchto účinků je na povrchu řezné plochy vytvořena tzv. bílá vrstva o síle 1 - 40 μm. Tato vrstva se vyznačuje martenzitickou strukturou o velké tvrdosti. Síla této vrstvy závisí především na vybíjecí energii impulsů. [45][46]

1.2 Tepelně ovlivněná oblast

Většina metod dělení plechů využívající nekonvenční technologie je založena na lokálním tavení materiálu a jeho odvodu z místa řezu. V okolí řezu vzniká v důsledku působení vysokých teplot tzv. tepelně ovlivněná oblast (TOO). TOO bývá popisována jako neroztavená oblast kovu v těsné blízkosti místa řezu, ve které došlo ke změnám materiálových vlastností či vnitřní struktury ve srovnání s tepelně neovlivněným základním materiálem. Vznik TOO je obvykle nežádoucí vedlejší efekt nekonvenčních metod dělení materiálu. Pojem TOO je hojně využíván i v oblasti svařování, kdy definuje oblast v blízkosti svaru s jinými chemickými a mechanickými vlastnostmi, než je materiál svaru a základního materiálu. [2][9][24]

Tepelně ovlivněná oblast se většinou skládá z více pásem. Nejširší pásmo (pásmo s nejvýraznějším projevem tepelného účinku dělení) se nazývá hlavní pásmo tepelně ovlivněné oblasti. Dochází v něm k velmi výrazným rozdílům vlastností v porovnání se základním materiálem (např. zvýšení tvrdosti, snížení chemické či korozní odolnosti nebo zhoršení obrobitelnosti). Za tímto pásmem následuje tzv. přechodové pásmo, ve kterém dochází k postupnému vyrovnání rozdílů mezi vlastnostmi hlavního pásma TOO a vlastnostmi základního materiálu. Velikost pásem TOO se u různých materiálů liší v závislosti na chemickém složení, tloušťce děleného materiálu, intenzitě působení a koncentraci tepelného účinku použitého při procesu dělení. [2][9]

Výrazný vliv na rozměry TOO mají i procesní parametry výrobních zařízení. Metody řezání, které pracují při vysokých teplotách a pomalé rychlosti, vedou k výraznější TOO. Naopak metody, které pracují při vysokých rychlostech vedou ke vzniku menší TOO. [2][9]

TOO může být často rozpoznána řadou barevných pásů viditelných v blízkosti řezů a svarů. Barvy způsobené povrchovou oxidací jsou přibližným ukazatelem teploty, kterou kov při dělení či svařování dosahuje. [47]

2 CÍL PRÁCE

Cílem dizertační práce je studium vlivu způsobu dělení materiálů na jejich vlastnosti, zejména na změny vlastností v okolí řezu. Pro účely práce byli vybráni zástupci ocelí s odlišnými vlastnostmi, u nichž byl posuzován vliv způsobu dělení (řezání plazmou, laserem, vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním) na míru tepelného ovlivnění místa řezu a drsnost rezné plochy.

Postup při řešení disertační práce:

- **Příprava zkušebních těles**
 - výběr vhodných typů ocelí
 - stanovení geometrie zkušebního tělesa
 - volba metod dělení materiálu
 - výroba zkušebních těles
 - příprava metalografických výbrusů
- **Měření definovaných vlastností**
 - měření tvrdosti metodou DSI
 - metalografická analýza materiálu
 - měření parametrů drsnosti
- **Statistické vyhodnocení naměřených dat**
- **Porovnání naměřených hodnot a určení možných korelací**

3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Disertační práce se zabývá měřením mikro-mechanických vlastností a drsnosti materiálů v místě řezů u vzorků vyhotovených různými způsoby dělení – řezáním laserem, plazmou, vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním. Hlavními zkoumanými parametry v této práci jsou tvrdost TOO, velikost TOO a drsnost plochy v místě řezu.

Přípravné práce se zabývaly především výrobou zkušebních těles pomocí vhodných technologií dělení a následnou přípravou metalografických výbrusů. Ke zjištění mikro-mechanických vlastností TOO a kvantifikaci její velikosti bylo zvoleno měření tvrdosti metodou DSI. Pro posouzení získaných výsledků byla zvolena optická analýza metalografických výbrusů. Ke stanovení drsnosti rezných ploch bylo využito bezkontaktní měření pomocí laserového skenovacího mikroskopu.

3.1 Příprava zkušebních těles

3.1.1 Výběr vhodných typů ocelí

Ve spolupráci s dodavateli zkušebních těles bylo na základě analýzy realizovaných zakázek za roky 2017 a 2018 zvoleno několik zástupců průmyslově běžně používaných ocelí různého chemického složení a mechanických vlastností.

- **Ocel 1.0553 (dle ČSN 11 523)**

Jedná se o nízko-uhlíkovou, nelegovanou konstrukční jemnozrnnou jakostní ocel vhodnou ke svařování. Chemické složení této oceli je uvedeno v Tab. 1.

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.0553

C [max. %]	Mn [max. %]	Si [max. %]	P [max. %]	S [max. %]	N [max. %]
0,20	1,60	0,55	0,030	0,030	0,012

- **Ocel 1.7102 (dle ČSN 14 260)**

Jedná se o středně-uhlíkovou pružinovou ocel s obtížnou svařitelností. Chemické složení oceli 1.7102 je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2 Chemické složení oceli 1.7102

C [max. %]	Mn [max. %]	Si [max. %]	P [max. %]	S [max. %]	Cr [max. %]	Ni [max. %]	Cu [max. %]
0,60	0,80	1,60	0,035	0,035	0,70	0,5	0,30

- **1.4301 (dle ČSN 17 420)**

Jedná se o korozivzdornou austenitickou ocel běžně obsahující cca 18 % chromu a cca 10 % niklu. Chemické složení oceli 1.4301 je uvedeno v Tab. 3.

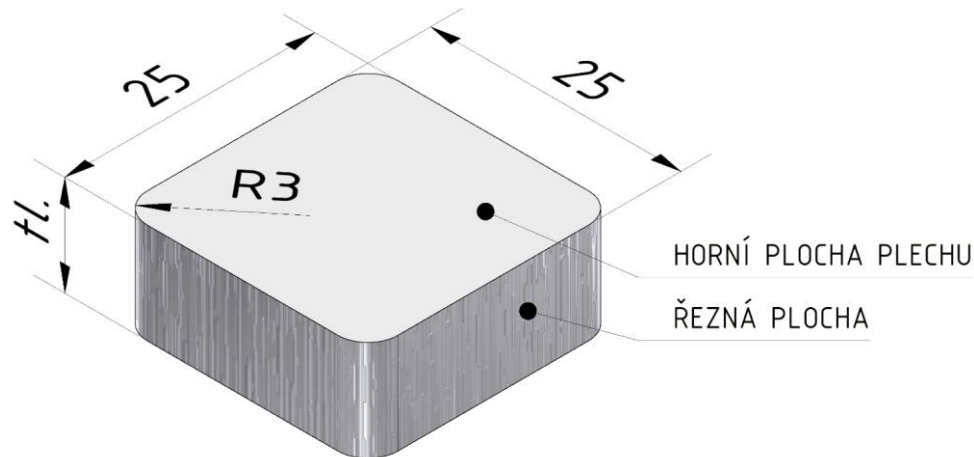
Tab. 3 Chemické složení oceli 1.4301

C [max. %]	Mn [max. %]	Si [max. %]	P [max. %]	S [max. %]	Cr [max. %]	Ni [max. %]
0,07	2,00	1,00	0,045	0,030	19,50	10,5

3.1.2 Stanovení geometrie zkušebního tělesa

Rozměr zkušebního tělesa byl zvolen s ohledem na rozměr teplotní komory lisovacího zařízení pro výrobu metalografických vzorků a pracovní prostor

nanotvrdoměru, na kterém bude probíhat měření. Zkušební těleso má čtvercovou základnu o délce hrany 25 mm. Výška zkušebního tělesa odpovídá tloušťce plechu, ze kterého je vyrobeno. V práci byly použity plechy o tloušťce 5, 10 a 15 mm. U některých nekonvenčních technologií je obecným problémem výroba ostrých hran. Z tohoto důvodu bylo zvoleno zaoblení ostrých rohů čtvercového profilu $R = 3$ mm. Rozměry zkušebního tělesa jsou uvedeny na Obr. 6.



Obr. 6 Rozměr zkušebního tělesa

3.1.3 Volba metod dělení materiálů

Pro výrobu zkušebních těles byli zvoleni čtyři zástupci nejběžnějších nekonvenčních technologií dělení materiálu. Jedná se o řezání laserem, plazmou, vodním paprskem s abrazivem a elektroerozivní drátové řezání.

Velikost TOO a kvalita řezné plochy je určena především volbou optimálních procesních parametrů pro konkrétní typ a tloušťku materiálu. Při výrobě zkušebních těles byly u všech technologií dělení voleny běžně komerčně používané procesní parametry vycházející z tzv. technologických tabulek. Ty jsou vytvářeny empiricky pro konkrétní materiály a tloušťky plechů přímo dodavatelem technologie a bývají často implementovány do programů, které tvoří CNC program řezání. V práci tedy nebude sledován vliv změny procesních parametrů na kvalitu řezu či hloubku TOO, ale vliv běžně používaných parametrů v komerčním provozu.

3.1.4 Výroba zkušebních těles

Polotovary pro výrobu zkušebních těles byly standardně dodávány plechy z materiálů 1.0553 (dle ČSN 11 523), 1.7102 (dle ČSN 14 260) a 1.4301 (dle ČSN 17 420) v tloušťkách 5, 10 a 15 mm. Povrch plechů nebyl nijak speciálně ošetřen a před dělením nebyl čištěn či odmašťován. Výroba zkušebních těles probíhala za běžných průmyslových podmínek.

Z každého polotovaru byla vyrobena tři zkušební tělesa. Jedno sloužilo pro měření tvrdosti TOO a pro metalografickou analýzu vnitřní struktury, druhé pro vyhodnocení drsnosti řezné hrany a třetí pro komparační měření na jiném tvrdoměru či kontrolní doměření v případě znehodnocení vzorku. Z důvodu minimálního ovlivnění místa řezu sousedním řezem byla při dělení laserem a plasmou předepsána minimální vzdálenost mezi vyráběnými zkušebními tělesy 20 mm.

3.1.4.1 Řezání laserem

Zkušební tělesa pro určení vlivu řezání laserem byla vyrobena pomocí CO₂ laseru na zařízení Trumpf TruLaser 3030. Procesní parametry (viz Tab. 4) vycházely z knihovny stroje. Pro všechny tloušťky a materiály plechů byl nastaven stejný výkon laseru 3200 W, jediným proměnlivým parametrem při řezání byla rychlost posuvu.

Tab. 4 Procesní parametry při řezání laserem

nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
rychlost posuvu	[m/min]	3,1 / 1,8 / 1,1			3,1 / 1,8 / 1,1			2,1 / 0,4 / 0,1		
výkon laseru	[W]	3200			3200			3200		

3.1.4.2 Řezání plasmou

Zkušební tělesa pro určení vlivu řezání plasmou byla vyrobena na CNC pálicím stroji Kjellberg pomocí plazmového invertoru HiFocus 80i, který je vhodný pro řezání všech elektricky vodivých materiálů v rozsahu tlouštěk 5 – 25 mm. Procesní parametry (viz Tab. 5) vycházely z knihovny stroje.

Tab. 5 Procesní parametry při řezání plasmou

nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
rychlost posuvu	[m/min]	3,5 / 2,3 / 1,2			3,5 / 2,3 / 1,2			3,5 / 2,3 / 1,2		
elektrický proud	[A]	50 / 80 / 80			50 / 80 / 80			50 / 80 / 80		

3.1.4.3 Řezání vodním paprskem s abrazivem

Zkušební tělesa pro určení vlivu řezání vodním paprskem byla vyrobena na zařízení Flow WaterJet Mach 4020c. Procesní parametry (viz Tab. 6) vycházely z knihovny stroje a byly shodné pro všechny materiály i jejich tloušťky.

Tab. 6 Procesní parametry při řezání vodním paprskem s abrazivem

nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
tlak vody	[MPa]	380			380			380		
rychlost posuvu	[mm/min]	320 / 150 / 60			320 / 150 / 60			320 / 150 / 60		
průtok abraziva	[kg/min]	0,45			0,45			0,45		
zrnitost abraziva	[μm]	150-300			150-300			150-300		

3.1.4.4 Elektroerozivní drátové řezání

Zkušební tělesa pro určení vlivu elektroerozivního drátového řezání byla vyrobena na zařízení FANUC ROBOCUT α -CiB. Použitý drát byl z mosazi o průměru 0,25 mm. Jako dielektrická kapalina byla použita deionizovaná destilovaná voda. Procesní parametry (viz Tab. 7) vycházely z knihovny stroje.

Tab. 7 Procesní parametry při elektroerozivním drátovém řezání

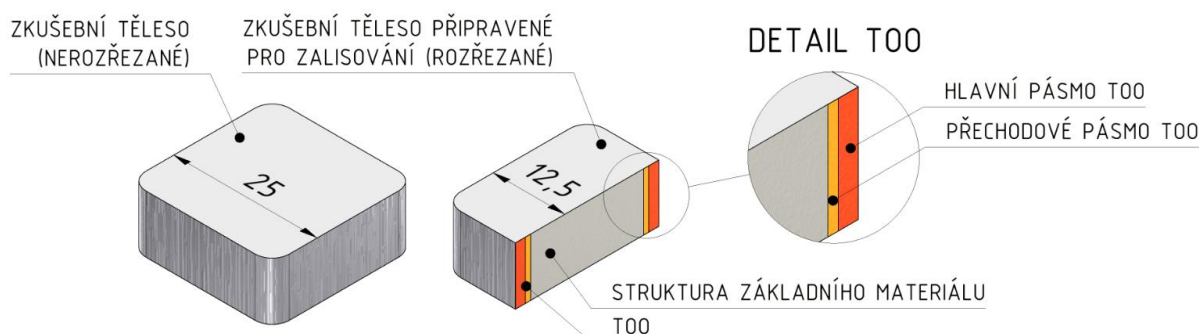
nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
rychlost posuvu	[mm/min]	12 / 9 / 6			12 / 9 / 6			12 / 9 / 6		
průměr drátu	[mm]	0,25			0,25			0,25		
počet řezů	[-]	1			1			1		
volba materiálu	[-]	ocel			ocel			nerez		

3.1.5 Příprava metalografických vzorků a výbrusů

Povrch pro měření tvrdosti metodou DSI musí svou kvalitou odpovídat metalografickému výbrusu. K jeho zhotovení byly využity všechny standardní operace přípravy metalografických vzorků.

Na vyrobených zkušebních tělesech však bylo nejprve nutné vytvořit řez, který by měření mechanických vlastností TOO a následnou optickou analýzu umožnil (viz Obr. 7). Všechna zkušební tělesa byla rozřezána diamantovým řezným kotoučem na metalografické rozbrušovací pile Buehler IsoMet 4000 v cca polovině své délky (12,5 mm od řezné hrany). Otáčky řezného kotouče byly nastaveny na 1800 ot/min a posuv řezného kotouče byl nastaven na 16 mm/min. Místo řezu bylo intenzivně chlazeno vodní sprchou, aby bylo nedošlo k tepelnému ovlivnění vlivem řezáním. Při řezání zkušebního tělesa nebyl zohledňován směr vláken

v materiálu. Byl však kladen důraz na to, aby zápal či místo vniku paprsku do materiálu vždy ležely mimo tuto oblast.



Obr. 7 Schéma vnitřní struktury zkušební tělesa s TOO a základním materiálem

Po rozřezání byla zkušební tělesa na lisovacím zařízení Buehler SimpliMet 1000 za tepla zalisována do lisovací hmoty PhenoCure. Zkušební těleso bylo do prostoru lisovací komory umístěno tak, aby rozřezaná plocha (plocha, na které bude měřena tvrdost a zkoumána struktura) ležela na jejím dnu. Lisování vzorků bylo provedeno za tlaku 29 MPa a teploty 150 °C. Čas ohřevu lisovací hmoty byl nastaven na 90 s, čas ochlazování na 240 s.

Následné broušení a leštění zalisovaných zkušebních těles probíhalo na leštičce Buehler EcoMet 250. Pro broušení a leštění byla použita různá brusná plátna s postupně zvyšující se zrnitostí (180, 320, 600 a 1200). Přítlačná síla vzorků byla při broušení nastavena na 30 N, otáčky hlavy lešticího přístroje na 40 ot/min a otáčky brusného plátna na 100 ot/min. Z každého zkušební tělesa bylo broušením odebráno cca 0,5 mm materiálu. Pro finální zaleštění vzorků bylo použito textilní plátno v kombinaci s diamantovou pastou CAMEO s velikostí zrn 9 μm a následně 3 μm .

3.2 Měření definovaných vlastností

3.2.1 Měření tvrdosti TOO

Tvrdost TOO byla měřena metodou DSI dle normy ČSN EN ISO 14577-1 na nanotvrdoměru TTX-NHT2 od společnosti CSM Instruments.

Jako vnikací těleso byl použit indentor typu Berkovich. Vyhodnocení naměřených údajů bylo provedeno metodou Oliver & Pharr. Hlavními sledovanými výsledky indentační zkoušky byly indentační tvrdost HV_{IT} a maximální indentační hloubka h_{max} .

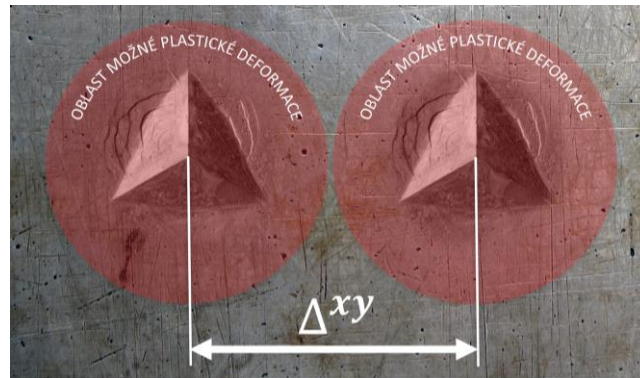
Volitelné parametry instrumentované indentační zkoušky byly s ohledem na doporučení uvedená v normě ČSN EN ISO 14577-1 nastaveny následovně:

- maximální aplikované zatížení: 500 mN

- výdrž na maximálním zatížení: 15 s
- zatěžující a odtěžující rychlost: 1 N/min.

Ke zjištění tvrdosti a velikosti TOO bylo použito maticové měření. Pro minimální vzdálenost mezi dvěma vtisky (znázorněno na Obr. 8) platí kvůli ovlivnění plastickou deformací již vytvořeného vtisku obecné doporučení:

$$\Delta^{xy} > 30 \cdot h_{max} \quad (29)$$



Obr. 8 Definice minimální vzdálenosti dvou sousedních vtisků

Před definováním minimální vzdálenosti mezi jednotlivými kroky měřicí matice je tedy nutné vytvořit vtlak stejným zatížením, které bude nastaveno v této matici jako maximální aplikované. Z maximální dosažené hloubky vtisku lze odvodit nejmenší doporučený krok.

V přípravných pracích před zahájením samotného měření tvrdosti na zkušebních tělesech byl proveden experiment, který měl za úkol určit minimální možnou vzdálenost mezi dvěma vtisky, při které ještě nedochází k ovlivnění místa indentace sousedním vtiskem. Tento experiment prokázal, že ani při použití poloviny doporučené vzdálenosti mezi dvěma sousedními vtisky nedochází k žádným rozdílům v porovnání s hodnotami naměřenými při striktním dodržení celé doporučené vzdálenosti. Experiment byl proveden na stejných materiálech a při stejných podmínkách, jaké byly následně použity při samotném měření tvrdosti na zkušebních tělesech.

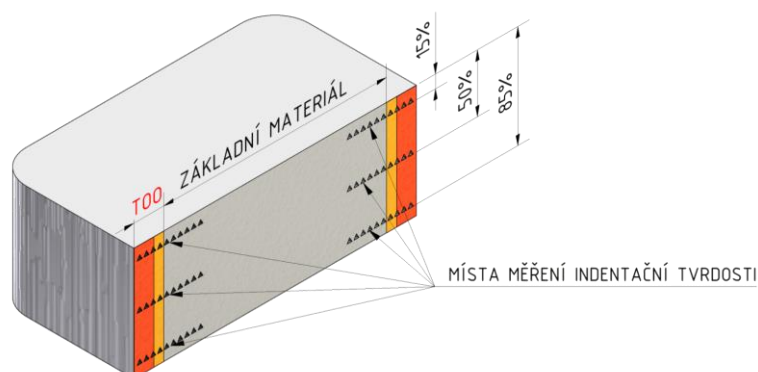
Z výše popsaného důvodu byla zvolena minimální vzdálenost mezi dvěma sousedními vtisky dle vzorce:

$$\Delta^{xy} > 15 \cdot h_{max} \quad (30)$$

Matice měření obsahovala celkem 39 pozic v jedné řadě a zasahovala do hloubky 5 mm od řezné hrany. Kvůli předpokládanému výskytu TOO byla vzdálenost mezi dvěma sousedními vtisky nastavena na 50 μm až do hloubky 1,5 mm

od řezné hrany. V této vzdálenosti se již předpokládá pouze vliv základního materiálu, proto byl další krok mezi dvěma sousedními vtisky nastaven na 500 μm až do hloubky 5 mm.

Měření tvrdosti TOO u každého zkušební tělesa bylo provedeno celkem na šesti místech - oboustranně v horních 15 % tloušťky od plochy kolmé na směr vniku paprsku, příp. drátové elektrody, v 50 % tloušťky a 85 % tloušťky (viz Obr. 9). Vícenásobné měření tvrdosti TOO na jednom zkušebním tělese má za cíl redukovat nehomogenitu materiálu ve vnitřní struktuře.



Obr. 9 Schéma měření indentační tvrdosti

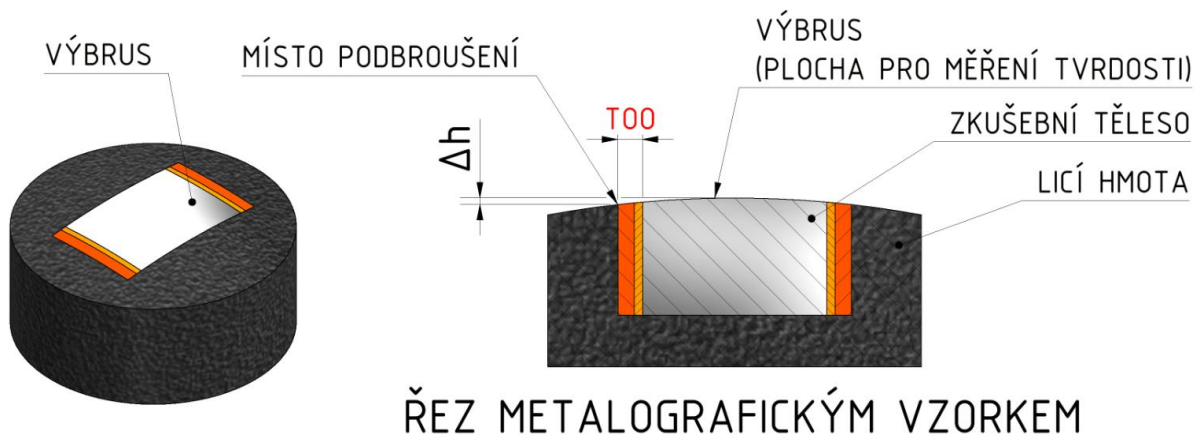
Jedním z kontrolních mechanismů nanotvrdoměru při maticovém měření je zjištění výšky povrchu testovaného materiálu před zahájením měření. Tento krok je v SW tvrdoměru označován jako ADO (Adjust Depth Offset). Zjištění výšky povrchu měřeného vzorku je prováděno pomocí referenčního kontaktního kroužku, který je znázorněn na Obr. 10.



Obr. 10 Konstrukční řešení vyhledávání povrchu vzorku při měření DSI

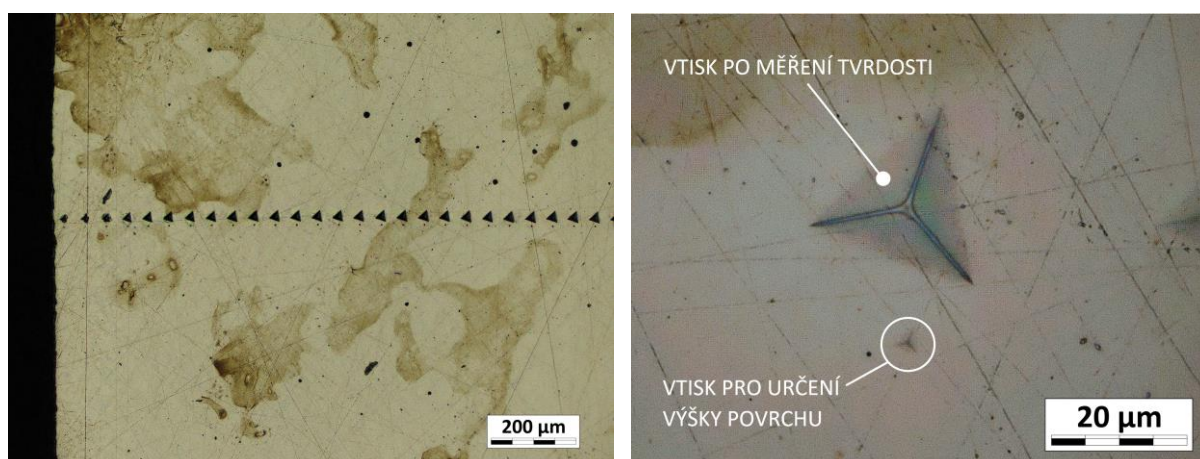
V místě styku lisovací hmoty a hrany zkušební tělesa docházelo při broušení na metalografické leštičce kvůli rozdílným tvrdostem licí hmoty a oceli

k podbrušování zkoumaného povrchu zkušební tělesa. Tento jev je znázorněn na Obr. 11. Při nastavení jednotné výšky povrchu docházelo u většího množství zkušebních těles ke zkreslování výsledků, prodlužování doby měření či úplnému přerušení zkoušky, protože nedošlo ke kontaktu indentoru s povrchem zkušební tělesa.



Obr. 11: Znázornění podbrušené plochy

Z výše uvedeného důvodu obsahovala každá měřicí matice mezi jednotlivými kroky mezioperaci, která zahrnovala vyhledání aktuální výšky povrchu - ADO. Aktuální výška povrchu je zjišťována kontaktem povrchu měřeného materiálu s referenčním kroužkem a následnou indentací povrchu provedenou velmi malým zatížením (25 mN) v blízkosti místa skutečného měření tvrdosti. Maticové měření s ADO prvky je znázorněno na Obr. 12. Zařazení těchto prvků do měřicí matice výrazně zrychlilo délku jednotlivých měření a zpřesnilo naměřené výsledky.



Obr. 12 Ukázka maticového měření (vlevo) a detail indentu (vpravo)

Pomocí popisné statistiky byla vyhodnocena směrodatná odchylka všech měření, která byla společně s hodnotami indentační tvrdosti a maximální indentační hloubky vynesena do grafů.

3.2.2 Optická analýza struktury TOO a základního materiálu

Pro optickou analýzu rozměrů a vnitřní struktury TOO byl zvolen 3D laserový skenovací mikroskop Keyence Laser Microscope.

Výhodou použití konfokálního mikroskopu je schopnost snímání sérií optických řezů z rovin nad a pod rovinou ostrosti, jejichž seskládáním lze získat ostrý obraz sledovaného povrchu. Vyhodnocení TOO u zalisovaných zkušebních těles by bylo při použití klasického mikroskopu velmi obtížné, protože sledovaná oblast metalografického výbrusu nebyla z důvodu podbroušení zkoumané plochy ve stejné hloubce ostrosti.

Před samotnou analýzou bylo nutné provést naleptání struktury zkušebních těles. Oceli 1.0553 (dle ČSN 11 523) a 1.7102 (dle ČSN 14 260) lze naleptat běžně používaným leptadlem Nital (5% kyselina dusičná), na korozivzdornou ocel 1.4301 (dle ČSN 17 420) bylo nutné připravit speciální leptadlo (směs kyseliny chlorovodíkové a chromové v poměru 3:1).

3.2.3 Měření drsnosti řezných ploch

Pro určení drsnosti řezných ploch byla zvolena bezkontaktní metoda měření profilu pomocí laserového mikroskopu Keyence Laser Microscope, který dokáže nasnímat jak povrch snímaného objektu, tak i jeho texturu. Vyhodnocení měření bylo realizováno v SW MultiFileAnalyzer dle doporučení udaných normou ČSN EN ISO 4287.

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Jako hlavní měřené materiály pro zjištění vlivu způsobu dělení na míru ovlivnění oblasti řezu byly vybrány tři oceli různého chemického složení a mechanických vlastností. Jedná se o oceli:

- 1.0553 (dle ČSN 11 523)
- 1.7102 (dle ČSN 14 260)
- 1.4301 (dle ČSN 17 420)

Z těchto ocelí byla pomocí čtyř nekonvenčních metod dělení materiálu vyrobena zkušební tělesa, na nichž byl zkoumán vliv použité metody na míru ovlivnění místa řezu. Jednalo se o technologie:

- Řezání laserem
- Řezání plazmou
- Řezání vodním paprskem
- Elektrojiskrové drátové řezání

Polotovary pro výroby zkušebních těles zvolenými metodami dělení byly standardně dodávané plechy z vybraných ocelí o tloušťkách:

- 5 mm
- 10 mm
- 15 mm

V práci byla provedena měření tvrdosti metodou DSI, která popisují velikost TOO sledováním změn mechanických vlastností. TOO byla rovněž analyzována pomocí metalografické analýzy. Navazující měření drsnosti řezných ploch si kladlo za cíl zjistit, zda existuje korelace mezi drsností povrchu a velikostí TOO.

Vliv vybraných způsobů dělení na vznik TOO je v tezi rozebrán pouze pro zkušební těleso z oceli 1.7102. Výsledky ostatních zkoumaných materiálů jsou uvedeny v disertační práci. Totéž platí pro výsledky metalografické analýzy, které jsou zde uvedeny pouze pro TOO vzniklou laserovým řezáním.

Zjištěné výsledky z měření indentační tvrdosti korelují s metalografickou analýzou.

4.1 Vyhodnocení tvrdosti a predikce rozměrů TOO

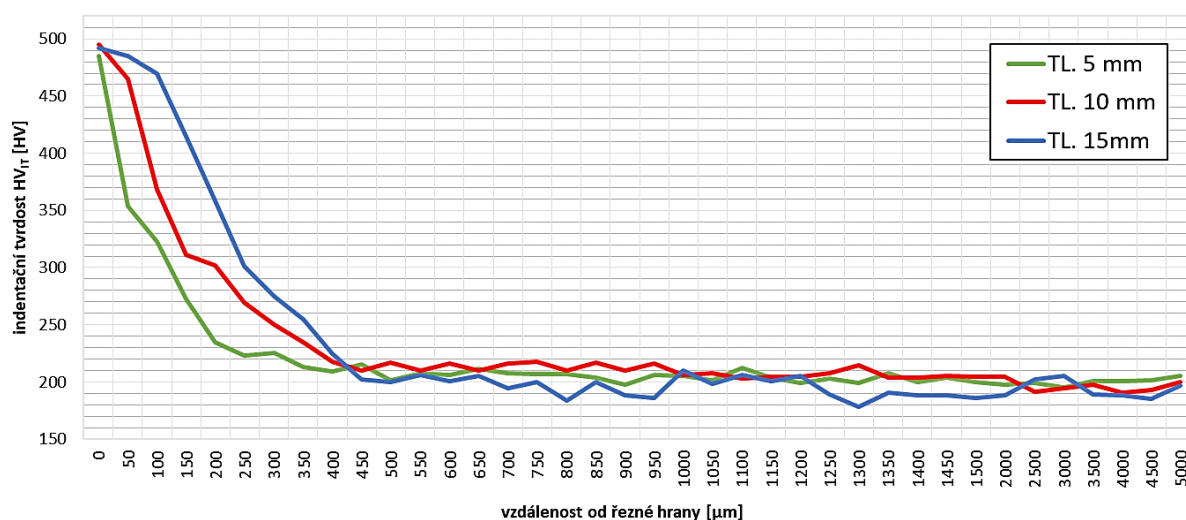
Tato část práce se zabývá vyhodnocením indentační tvrdosti v místě řezu zvolenými způsoby dělení. Posuzováním průběhu tvrdosti lze bez použití metalografické analýzy predikovat změny ve vnitřní struktuře materiálu a zároveň i rozměry TOO. Oblasti s konstantním průběhem tvrdosti budou mít velmi pravděpodobně homogenní strukturu, naopak oblasti s klesajícím průběhem tvrdosti budou pravděpodobně přechodovými pásmy s nehomogenní strukturou.

Drobné výkyvy hodnot v pásmech s konstantní tvrdostí však nemusí nutně znamenat změny ve vnitřní struktuře materiálu – struktura základního materiálu nemusí být vždy zcela homogenní nebo může obsahovat více fází s rozdílnou tvrdostí. Uspořádání struktury může být jak pravidelné (např. řádkovitá feriticko-perlitická struktura plechů způsobená válcováním), tak nepravidelné (např. feriticko-perlitická struktura po žhání). Vícenásobné měření tvrdosti TOO na jednom zkušebním tělese mělo možné rozdíly ve vnitřní struktuře alespoň částečně redukovat.

U každého zkušebního tělesa byla po naměření průběhu tvrdosti provedena ještě kontrolní metalografická analýza, která si kladla za cíl vizuálně podpořit naměřené výsledky. Podrobnější metalografická analýza s vyhodnocením strukturálního složení a rozměrů TOO je provedena v kapitole 4.2.

Provedená měření tvrdosti metodou DSI ukázala, že tloušťka děleného materiálu má vliv na velikost TOO. Vliv tloušťky materiálu na míru ovlivnění místa řezu u oceli 1.0553 je znázorněn na Obr. 13. Pro tepelné způsoby dělení pomocí paprsku se dá obecně říci, že čím větší je tloušťka děleného materiálu, tím větší je míra ovlivnění místa řezu (tím více roste šířka TOO měřená od řezné hrany).

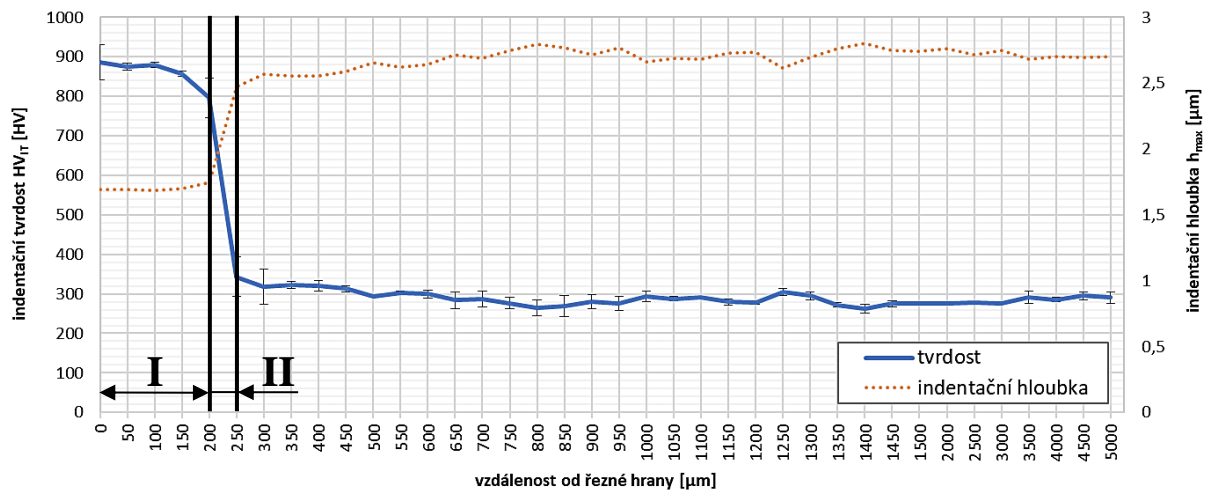
Výsledky uvedené v této kapitole reprezentují pouze zkušební tělesa o tloušťce 15 mm. Výsledky pro menší tloušťky dělených materiálů vykazují z hlediska indentační tvrdosti tendenčně stejný průběh, TOO je však užší.



Obr. 13 Vliv tloušťky zkušebního tělesa na vlastnosti TOO – ocel 1.0553, řez laserem

4.1.1 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)

4.1.1.1 Řezání laserem

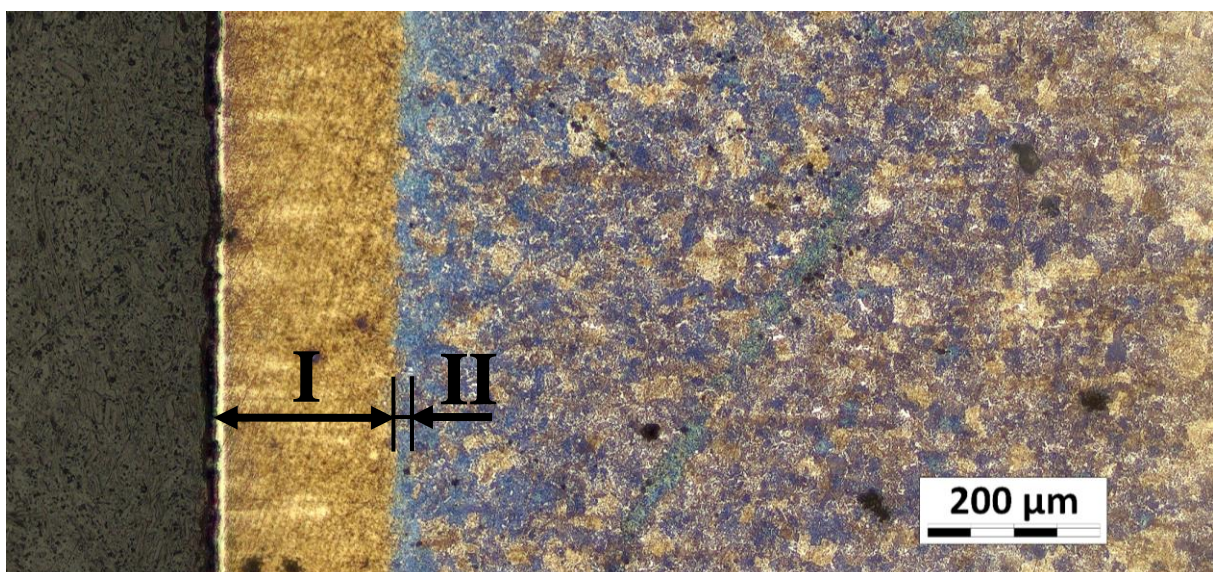


Obr. 14 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.7102

Průběh indentační tvrdosti po dělení oceli 1.7102 laserem je znázorněn na Obr. 14. V místě řezu vznikla TOO o šířce cca 0,25 mm, která se skládá ze dvou pásem. Hlavní pásmo TOO (I) je široké 0,20 mm a maximální indentační tvrdost HV_{IT} v této oblasti je 890 HV.

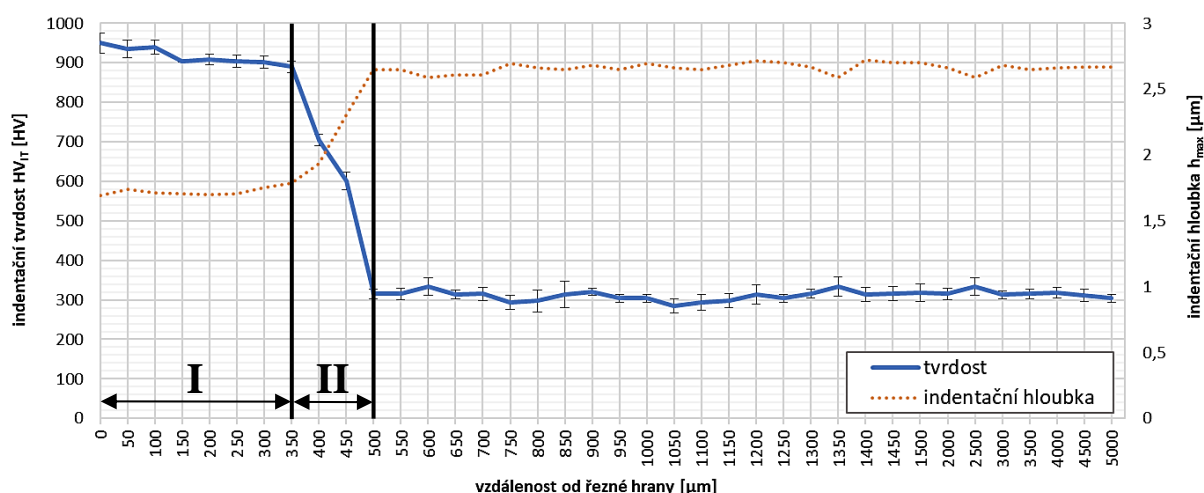
Za touto oblastí následuje velmi úzké přechodové pásmo (II) o šířce 0,05 mm, ve kterém dochází k téměř skokovému poklesu tvrdosti TOO až na tvrdost základního materiálu $HV_{IT} = 295$ HV.

Uvedená zjištění korelují s komparační metalografickou analýzou, jejíž výstup je znázorněn na Obr. 15. Podrobnější popis struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 15 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení laserem

4.1.1.2 Řezání plazmou



Obr. 16 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.7102

Obdobná tendence jako v případě dělení laserem je pozorovatelná i při dělení oceli 1.7102 plazmou. Průběh indentační tvrdosti je znázorněn na Obr. 52. V blízkosti řezu vznikla TOO o šířce 0,50 mm, která je tvořena dvěma pásmy. Hlavní pásmo TOO (I) je široké 0,35 mm a maximální naměřená indentační tvrdost HV_{IT} v této oblasti je 945 HV.

Za touto oblastí následuje přechodové pásmo (II), ve kterém dochází k pozvolnému snížení tvrdosti na tvrdost základního materiálu HV_{IT} = 295 HV. Šířka tohoto pásma je 0,15 mm.

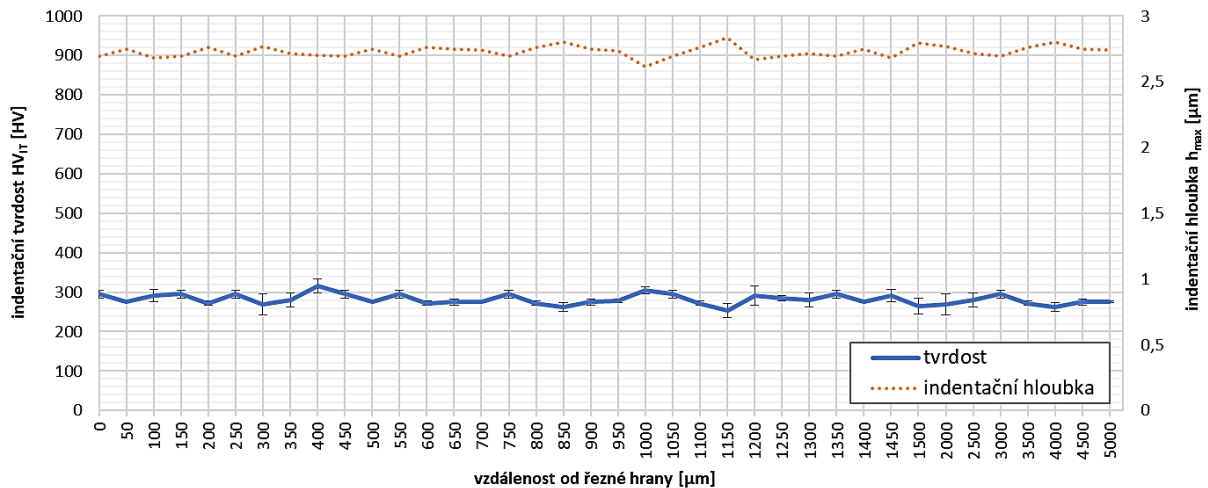
V porovnání s TOO vyvolanou řezáním laserem jsou v případě řezání stejné oceli plazmou obě pásma TOO téměř dvojnásobně širší. Rovněž je dosaženo i vyšší indentační tvrdosti v hlavním pásmu TOO (rozdíl cca 6%).

Naměřené výsledky jsou podpořeny vyhodnocením metalografické analýzy, jejíž výstup je znázorněn na Obr. 17.



Obr. 17 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení plazmou

4.1.1.3 Elektroerozivní drátové řezání



Obr. 18 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.7102

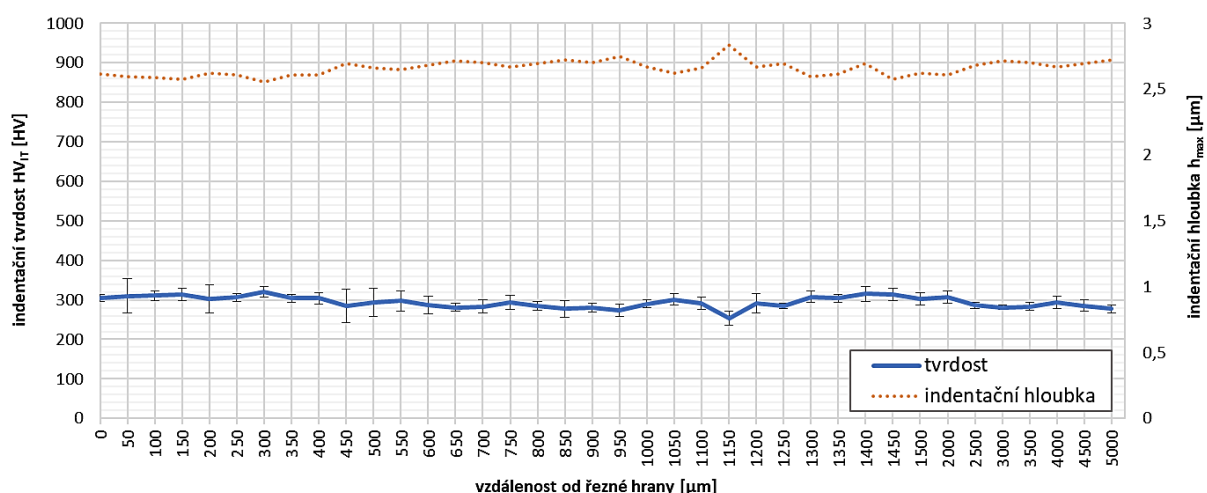
Stejně jako v případě dělení oceli 1.0553 pomocí elektrojiskrového drátového řezání nedochází ani v případě dělení oceli 1.7102 touto metodou v blízkosti řezu k měřitelným změnám indentační tvrdosti. Průběh indentační tvrdosti je znázorněn na Obr. 18. U naměřených výsledků v místě řezu nedochází k žádným výrazným výkyvům od hodnoty indentační tvrdosti základního materiálu $HV_{IT} = 195$ HV.

Metalografická analýza znázorněná na Obr. 19 ukázala, že v oblasti řezu nedochází ke vzniku hlavního TOO pásma. Přesto však vlivem tepelnému účinku této metody došlo v těsné blízkosti řezu ke vzniku tenké vrstvy široké několik mikrometrů.



Obr. 19 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po elektroerozivním drátovém řezání

4.1.1.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 20 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.7102

Při dělení oceli 1.7102 vodním paprskem nevznikla v blízkosti řezu žádná TOO. Zkouška nanotvrlosti měla prokázat, zda nedošlo k lokálnímu zvýšení tvrdosti vlivem mikroplastické deformace způsobené působením abraziva v místě řezu. Průběh indentační tvrdosti je zobrazen na Obr. 20.

Výsledky měření indentační tvrdosti nevykazují v místě řezu žádné rozdíly v porovnání se základním materiálem o indentační tvrdosti $HV_{IT} = 295$ HV.

Žádné změny struktury nebyly pozorovány ani při optické analýze metalografického výbrusu. Výstup z této analýzy je Obr. 21.



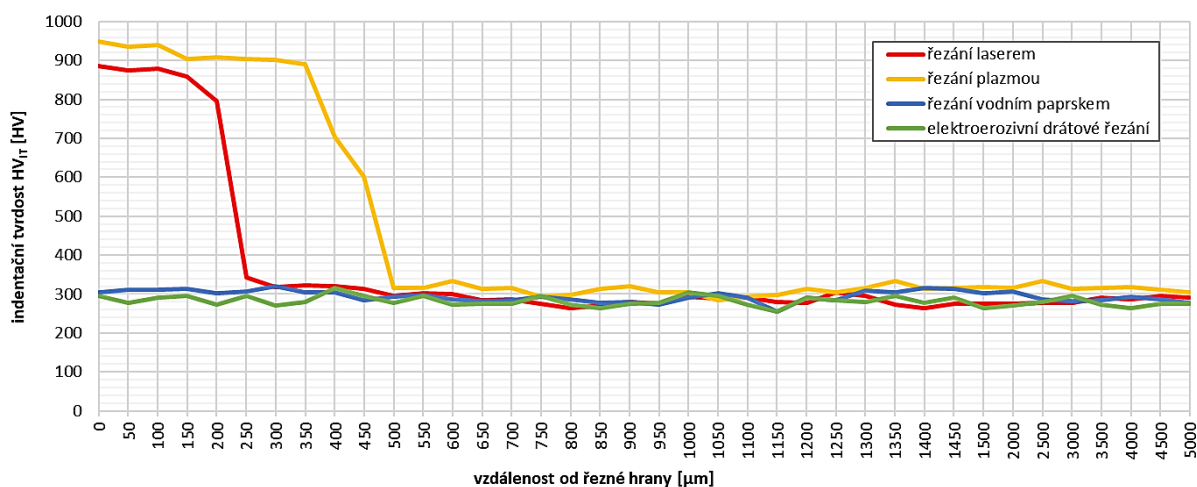
Obr. 21 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení vodním paprskem

Porovnání vlivu všech použitých metod dělení na vznik TOO a změnu mechanických vlastností pro všechny testované materiály je shrnuto v grafech na Obr. 22.

Z uvedených výsledků je patrné, že tepelné účinky jednotlivých technologií na místo řezu jsou odlišné. Největší tepelný účinek ze všech použitých technologií má řezání plazmou.

U ocelí 1.0553 i 1.7102 se vyšší tepelný účinek plazmy projevuje vznikem širší TOO (v porovnání s řezáním laserem). V případě oceli 1.7102 rovněž dochází k rozdílům v nejvyšší naměřené tvrdosti v hlavním pásmu TOO.

Z grafů je rovněž patrné, že dělení materiálu vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním nevyvolává vznik TOO s měřitelnou změnou tvrdosti. Metalografická analýza struktury místa řezu však ukázala, že při dělení zkušebních těles elektroerozivním drátovým řezáním docházelo v místě řezu u ocelí 1.0553 i 1.7102 ke vzniku tenkých vrstev s rozměry v řádech jednotek mikronů, které vykazovaly jinou strukturu než byla struktura základního materiálu. Tvrdost těchto vrstev nebyla vzhledem ke svým rozměrům a umístění na zkušebním tělese změřitelná.



Obr. 22 Porovnání vlivu technologií dělení na vlastnosti TOO – ocel 1.7102

4.2 Optická analýza struktury TOO a základního materiálu

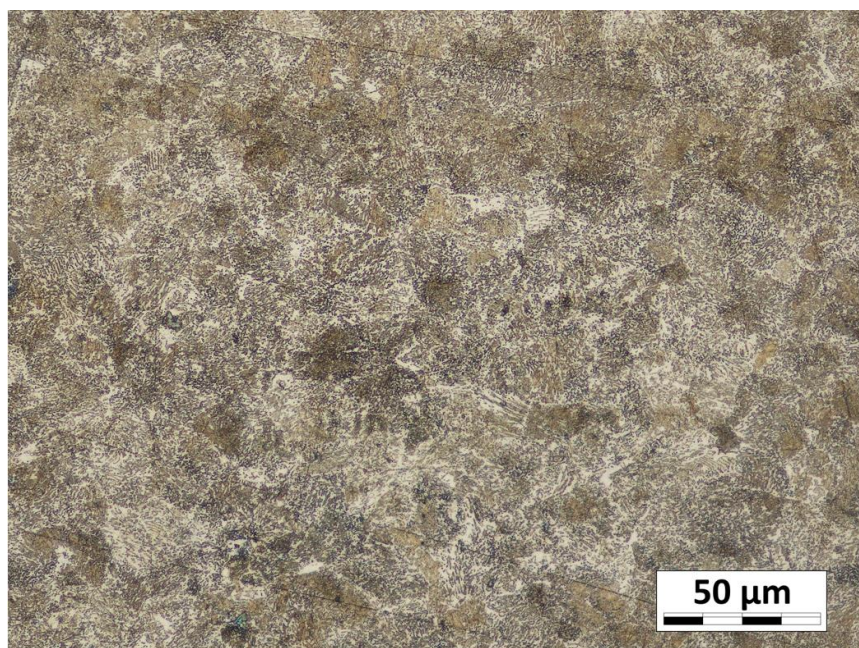
Optická analýza rozměrů a vnitřní struktury TOO u naleptaných zkušebních těles byla provedena na 3D laserovém skenovacím mikroskopu Keyence Laser Microscope. Cílem této analýzy bylo především ověření předpokladu, že posouzením průběhu tvrdosti lze predikovat strukturní složení či změny struktury materiálu. Základem této hypotézy je myšlenka, že oblasti s konstantním průběhem tvrdosti budou mít velmi pravděpodobně homogenní vnitřní strukturu a naopak u oblastí s klesajícím či vzrůstajícím průběhem tvrdosti bude velmi pravděpodobně docházet ke změnám ve vnitřní struktuře.

Cílem optické analýzy bylo rovněž určení, nakolik přesný je odhad reálných rozměrů TOO pouze z výsledků měření tvrdosti metodou DSI bez doprovodné optické analýzy.

Optická analýza prokázala, že při řezání vodním paprskem nedochází u žádného zkušebního tělesa ke vzniku TOO či jiné opticky identifikovatelné oblasti s odlišnou strukturou než je struktura základního materiálu. Z tohoto důvodu nejsou v této části práce výsledky z dělení vodním paprskem prezentovány.

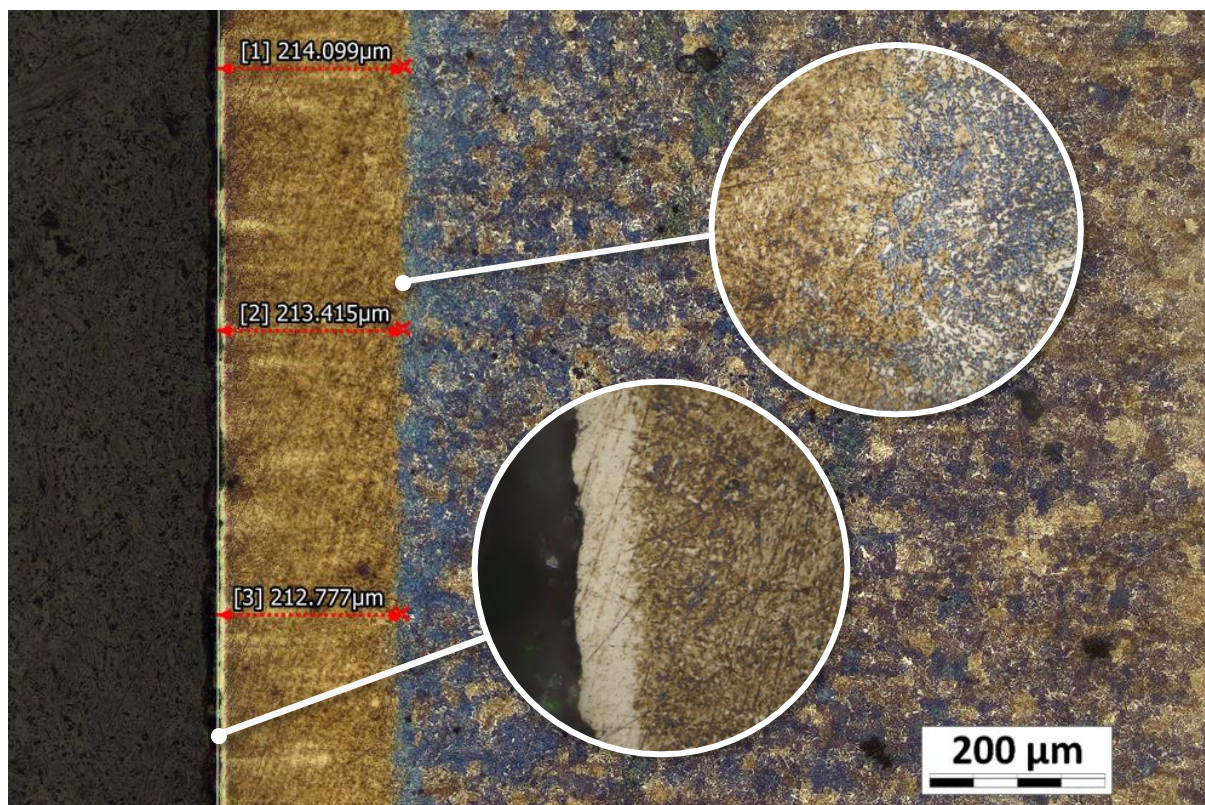
4.2.1 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)

Základní materiál oceli 1.7102 je stejně jako u oceli 1.0553 tvořen feriticko-perlitickou strukturou. Perlit je však ve feritu vyloučen v globulární formě. Materiál plechů byl po válcování pravděpodobně vyžihán na měkko. Struktura tohoto materiálu je znázorněná na Obr. 23.



Obr. 23 Feriticko-perlitická struktura základního materiálu 1.7102

4.2.1.1 Určení velikosti TOO při řezání laserem



Obr. 24 Měření rozměrů TOO při řezání laserem – ocel 1.7102

Z optické analýzy na Obr. 24 vyplývá, že při dělení laserem vznikla ve zkušebním tělese z materiálu 1.7102 TOO o šířce cca 0,21 mm. TOO se skládá celkem ze dvou pásem .

První pásmo je široké cca 0,012 mm, je tvořené čistě martenzitickou strukturou a opticky připomíná tzv. bílou vrstvu, která vzniká při elektroerozivním drátovém řezání. Za tímto pásmem následuje hlavní pásmo TOO o šířce cca 0,21 mm. Jeho struktura je tvořena jehlicovitou martenzitickou strukturou. Za hlavním pásmem TOO následuje velmi úzká přechodová oblast široká cca 0,045 mm, ve které dochází k téměř okamžité změně na feriticko-perlitickou strukturu základního materiálu.

Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 8.

Tab. 8 Rozměry TOO při řezání oceli 1.7102 laserem

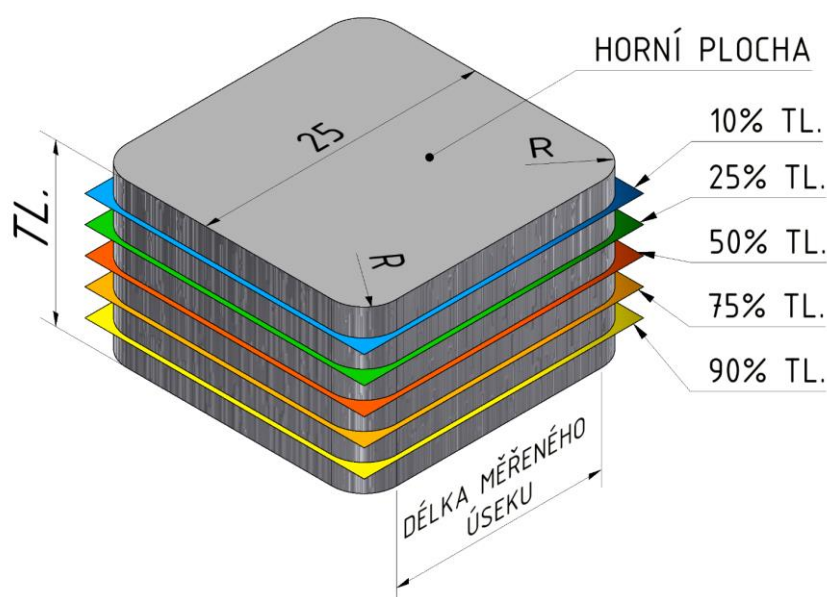
	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka bíle vrstvy	neidentifikováno	12
šířka hlavního pásma TOO	200	212
šířka přechodového pásma	50	45
šířka TOO	250	250

4.3 Vyhodnocení drsnosti řezných ploch

Pro měření drsnosti řezných ploch byla využita bezkontaktní metoda měření profilu pomocí laserového mikroskopu Keyence Laser Microscope. Přestože dodavatelé zařízení pro nekonvenční dělení uvádí drsnost řezných ploch při různých procesních parametrech jako jednu hodnotu, z povrchu řezných ploch některých zkušebních těles je zřejmé, že drsnost na celé řezné ploše není konstantní.

Drsnost řezné plochy zkušebního tělesa byla měřena v celkem pěti řezných rovinách rovnoběžných s horní plochou zkušebního tělesa. Horní plocha zkušebního tělesa je shodná s horní plochou plechu, který sloužil jako polotovar pro jeho výrobu. Je to rovněž plocha, na kterou začal působit paprsek či nástroj při zahájení procesu dělení. Vzdálenost řezných rovin od horní plochy zkušebních těles je 10%, 25%, 50%, 75% a 90% tloušťky zkušebního tělesa (viz Obr. 25). Drsnost řezné plochy byla v těchto rovinách měřena liniově po celé délce hrany zkušebního tělesa mimo technologických rádiusů ostrých rozích (cca 20 mm). Vyhodnocovanými parametry drsnosti byly:

- největší výška profilu drsnosti Rz
- průměrná aritmetická úchylna profilu Ra



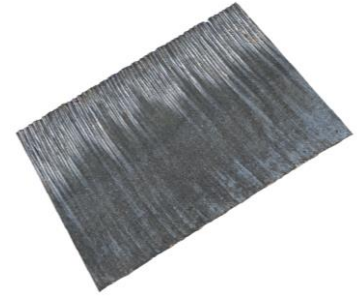
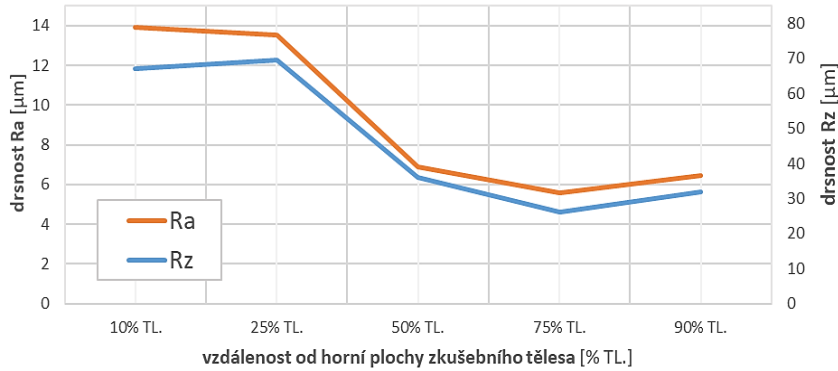
Obr. 25 Schéma měření drsnosti na zkušebním tělese

V této části jsou prezentovány pouze výsledky měření drsnosti ploch u zkušebních těles tloušťky 15 mm pro ocel 1.17102. U většiny zkušebních těles této tloušťky byla pozorována největší nekonzistentnost drsnosti na šířce řezné plochy.

Při měření drsnosti laserovým skenovacím mikroskopem byla rovněž nasnímaná textura řezné plochy, která sloužila pro zhodnocení pohledových vlastností řezné plochy.

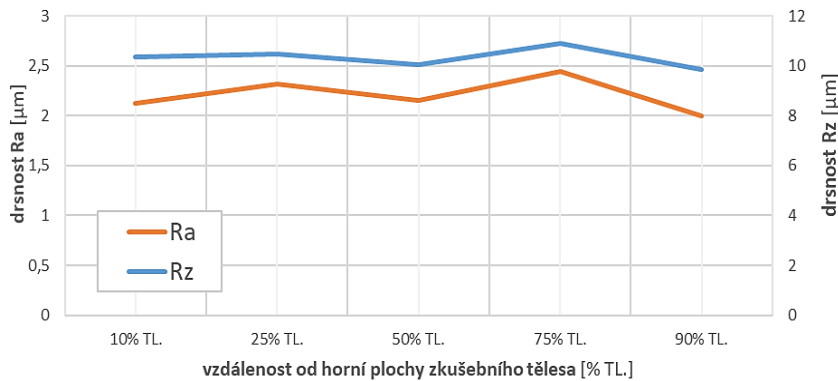
4.3.1 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)

4.3.1.1 Řezání laserem



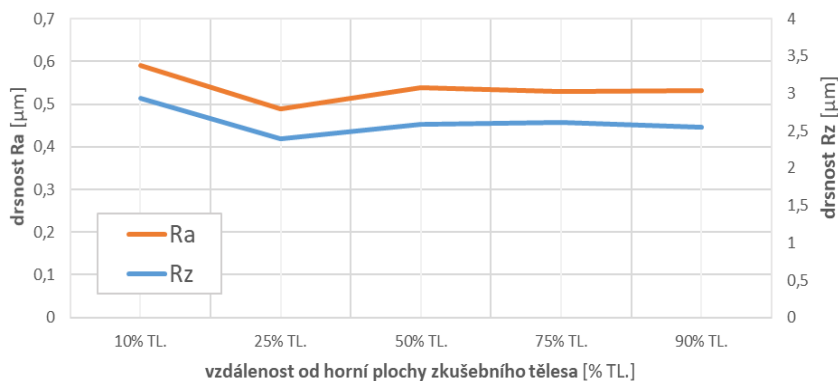
Obr. 26 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez laserem

4.3.1.2 Řezání plazmou



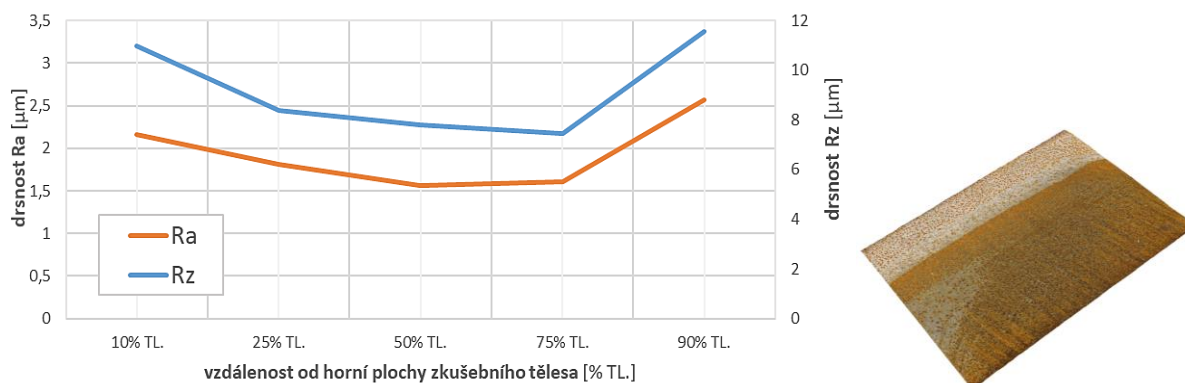
Obr. 27 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez plazmou

4.3.1.3 Elektroerozivní drátové řezání



Obr. 28 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání

4.3.1.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 29 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez vodním paprskem

5 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Hlavním přínosem pro vědu je objasnění vlivu použité technologie dělení na vlastnosti vybraných typů ocelí, zejména změn vlastností v okolí místa řezu a kvality řezné plochy. Dalším přínosem je ověření vhodnosti využití instrumentované zkoušky tvrdosti (DSI) pro posuzování mechanických změn testovaných ocelí v okolí místa řezu. Zvolená metoda měření tvrdosti umožňuje studovat oblasti extrémně blízké místu řezu a má vysokou vypovídající schopnost, zejména ve spojitosti s hodnocením struktury na metalografických výbrusech.

Metoda bezkontaktního měření drsnosti povrchu řezných ploch umožňuje popis a kvantifikaci drsnosti povrchu s ohledem na použitou technologii a tloušťku řezaného materiálu.

Většina plošných výpalků do tloušťky 5 mm nepotřebuje z hlediska obecných požadavků průmyslu žádné další obrábění řezných ploch, protože drsnost řezných ploch obvykle vyhovuje požadavkům zákazníka. U větších tloušťek materiálů je jakost řezné plochy výrazně ovlivněna použitou technologií dělení.

Výpalky větších tloušťek se velmi často používají jako polotovary a vyžadují další obrábění. Při volbě nástroje pro obrábění řezné hrany se v praxi velmi často nezohledňuje zvýšená tvrdost TOO. Nevhodná volba nástroje pro obrobení řezné plochy má negativní vliv na jeho opotřebení a životnost. Z hlediska životnosti obráběcích nástrojů je další studium této problematiky velmi žádoucí.

Význam práce pro praxi je v možnosti využití získaných výsledků při volbě vhodného obráběcího nástroje pro konkrétní typ vstupního polotovaru s ohledem na jeho technologii výroby. Optimálně zvolený nástroj pro dokončovací operace po nekonvenčních způsobech dělení by měl nalézt kompromis mezi životností nástroje a tvrdostí a jakostí obráběného povrchu.

6 ZÁVĚR

Hlavní náplní disertační práce bylo stanovení vlivu nekonvenčních metod dělení vybraných ocelí na změnu jejich vlastností v místě řezu. Provedený výzkum ukázal, že s výjimkou korozivzdorné oceli 1.4301 došlo ve všech ostatních případech v místě řezu ke vzniku TOO s výrazně vyšší tvrdostí, než je tvrdost základního materiálu. Přítomnost TOO se dá predikovat i podle zabarvení v místě řezu. Zabarování místa řezu však zkušebních tělesech bylo pozorováno jen u oceli 1.4301.

Velikost pásem TOO se u vybraných ocelí liší v závislosti na chemickém složení, tloušťce děleného materiálu a intenzitě a koncentraci tepelného účinku použitého při procesu dělení. Měření tvrdosti metodou DSI ukázala, že tloušťka děleného materiálu má výrazný vliv na velikost TOO. Pro dělení laserem a plazmou se dá obecně říci, že čím větší je tloušťka děleného materiálu, tím více roste šířka TOO měřená od řezné hrany.

Při dělení oceli 1.0553 laserem a plazmou dosahovala nejvyšší indentační tvrdost v TOO hodnot téměř 500 HV. Při dělení oceli 1.7102 stejnými metodami a shodnými procesními parametry byla nejvyšší naměřená indentační tvrdost v TOO v rozsahu 900 – 950 HV. Tento rozdíl je způsoben především rozdíly v chemickém a strukturním složení obou ocelí. Nejvýraznější vliv na velikost a tvrdost TOO z pohledu chemického složení má množství uhlíku v oceli. Rozdíly maximálních naměřených hodnot indentační tvrdosti rovněž souvisí s podílem zbytkového austenitu v martenzitické struktuře a jeho rozložením v neovlivněné základní struktuře.

Výrazný vliv na rozměry TOO mají i procesní parametry výrobních zařízení. Metody řezání, které pracují při vyšších teplotách a nižší rychlosti, vytvářejí větší TOO. Provedená měření prokázala, že tepelný účinek plazmy je výrazně vyšší než tepelný účinek laseru. Toto zjištění se projevilo rozdílnou šířkou TOO a je podpořeno jak průběhem indentační tvrdosti, tak metalografickými analýzami u oceli 1.0553 a 1.7102.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že velikost TOO se zvýšenou indentační tvrdostí se u zkoumaných ocelí pohybuje od 0,20 do 0,60 mm. U austenitické oceli 1.4301 byla přítomnost úzké vrstvy TOO potvrzena až při metalografické analýze. V této vrstvě došlo k viditelné změně struktury, která se však neprojevuje zvýšením indentační tvrdosti. Tato vrstva je po dělení laserem i plazmou široká cca 0,10 mm a vlivem tepelného účinku laserového paprsku v ní došlo k precipitaci karbidů chromu. Tento jev se nazývá zcitlivění korozivzdorných ocelí a je velmi často doprovázen vznikem mezikrystalové koroze a snížením chemické odolnosti. Odstranění této vrstvy lze dosáhnout tzv. rozpouštěcím žíháním při teplotě 1000 – 1150 °C, při kterém dojde k opětovnému rozpuštění vyloučených karbidů.

Z naměřených výsledků je rovněž zřejmé, že při řezání vodním paprskem s abrazivem nedochází u žádného zkušebního tělesa ke vzniku TOO či jiné opticky identifikovatelné oblasti s odlišnou strukturou než je struktura základního materiálu.

Získané výsledky z měření nanotvrdosti metodou DSI poskytnou přesnou informaci o rozměrech TOO, kterou je v běžné praxi možné detekovat pouze pomocí metalografických a optických metod. Data z tohoto výzkumu bude rovněž možné aplikovat do výpočtových modelů FEM analýz pro ověření tepelného vlivu vybraných metod nekonvenčních způsobů dělení.

Metalografická analýza zkušebních těles vyrobených tepelným způsobem dělení rovněž prokázala výskyt drobných povrchových vad na řezné ploše. Vlivem vysoké ochlazovací rychlosti docházelo u zkušebních těles v TOO k vnitřnímu pnutí, které se projevilo vznikem trhlin a jejich dalším šířením po hranicích zrn. Tato místa všeobecně vykazují nejnižší odolnost proti korozi a rovněž v nich dochází k výraznému zhoršení mechanických vlastností. Nejnáchylnější ke vzniku povrchových vad a trhlin z testovaných ocelí byla ocel 1.7102.

Výsledky získané měřením drsnosti řezných ploch ukázaly velkou nekonzistentnost drsnosti v různých místech řezné plochy při dělení laserem a plazmou. Obecně bylo lepší drsnosti dosahováno při dělení vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním. Nejnižší drsnosti bylo dosahováno při elektroerozivním drátovém řezání. Nejlepší pohledové vlastnosti řezu vykazovalo dělení vodním paprskem.

LITERATURA

- [1] KOCMAN, K. a kol. Technologie obrábění. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005, 270 s.
- [2] BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění. *Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT*, 1989.
- [3] KUNCIPÁL, J. a kol. Teorie svařování, Praha: SNTL, 1986, 265 s.
- [4] RICKFÄLT, C. et al. Oxy-fuel cutting of thick plates. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*. 1995, vol. 35, iss. 4, pp. 238-242. ISSN 0043-2288.
- [5] KUPKA, J. Vliv řezání kyslíkem na vlastnosti základního materiálu. Praha, 2015. 135 s. *Diplomová práce*. České vysoké učení technické v Praze.
- [6] KRAUS, M. Cutting techniques influence on a properties of tool steels. *METAL 21.-23.5. 2014 Brno*. 2014.
- [7] HARRIS, J. et al. Laser cutting of thick plate. *Materials Forum*. 2001, vol. 25, pp. 88-115. ISSN 0883-2900.
- [8] ION, J. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application, 2005. 576 s.
- [9] MAŇKOVÁ, I. Progresívne technologie. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [10] KOLEKTIV AUTORŮ. Laser processing – CO₂ Laser. *Technická dokumentace*. TRUMPF Werkzeugmaschine, GmbH+Co KG. 02/2007.
- [11] BROD, D at al. A powerful CO₂ cutting tool, *Laser Focus*, August 1969, pp.36
- [12] HILTON, P. A. In the beginning (The history of laser cutting). Presented at ICALEO 2002 Scottsdale, Arizona, USA. 2002.
- [13] FLEMMING, O. O. Laser Cutting. *Laser Technologies in Industry*. 1988.
- [14] *Optics and Laser Technology*. 2018, vol. 103, pp. 311-317. ISSN 0030-3992.
- [15] RODRIGUES, G.C. et al. Laser cutting with direct diode laser. *Physics Procedia*. 2013, vol. 41, pp. 558-565. ISSN 1875-3884.
- [16] WANDERA, C. et al. Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminium using a high power fiber laser. *Journal of Laser Applications*. 2009, vol. 21, pp. 154-161. ISSN 1042-346X.
- [17] SHIN, J.S. et al. Laser cutting of steel plates up to 100 mm in thickness with a 6-kW fiber laser for application to dismantling of nuclear facilities. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018, vol. 100, pp. 98-104. ISSN 0143-8166.
- [18] RODRIGUES, G.C. et al. Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP*. 2018, vol. 74, pp. 714-718. ISSN 2212-8271.
- [19] ANAND, Y. et al. Optimization of machining parameters for green manufacturing. *Cogent Engineering*. 2016, vol. 3, pp. 1-16. ISSN 2331-1916.

- [20] ALSOUFI, M.S. et al. Experimental study of surface roughness and micro-hardness obtained by cutting carbon steel with abrasive waterjet and laser beam technologies. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2016, vol. 4, iss. 5, pp. 173-181. ISSN 2328-4102.
- [21] POCORNI, J. et al. The geometry of the cutting front created by fibre and CO₂ lasers when profiling stainless steel under standard commercial conditions. *Optics and Laser Technology*. 2018, vol. 103, pp. 318-326. ISSN 0030-3992.
- [22] SEON, S. et al. Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting.
- [23] POCORNI, J. et al. Measuring the melt flow on the laser cut front. *Physics Procedia*. 2015, vol. 78, pp. 99-109. ISSN 1875-3884.
- [24] MOHYLA, P. et al. Investigation of heat affected zone of steel P92 using the thermal cycle simulator. *International Scholarly and Scientific Research and Innovation*. 2017, vol. 11, pp. 464-467.
- [25] RODRIGUES, G.C. et al. Theoretical and experimental aspects of laser cutting with elliptically polarized laser beams. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 264, pp. 448-453. ISSN 0924-0136.
- [26] GUNES, T. Effect of laser-cutting and spark erosion techniques and heat treatment on the magnetic properties of grain-oriented transformer steels. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2018, vol. 31, pp. 3933-3939. ISSN 1557-1939.
- [27] TAMURA, K., YAMAGISHI, R. Observation of the molten metal behaviors during the laser cutting of thick steel specimens using attenuated process images. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2017, vol. 54, pp. 655-661. ISSN 0022-3131.
- [28] ANDERSON, N., GRANBERG, C. Laser cutting in Ti-6Al-4V sheet: DOE and evaluation of process parameters informative. Gothenburg, Sweden, 2015. 45 s. Diplomová práce. Chalmers University in Gothenburg.
- [29] CHOUBEY, A. et al. Studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of thick stainless steel in dry air and underwater environment for dismantling applications. *Optics and Laser Technology*. 2015, vol. 71, pp. 6-15. ISSN 0030-3992.
- [30] LI, G., THOMAS, B.G. Thermo-mechanical finite element model of shell behavior in continuous casting of steel. *The Mineral, Metals and Materials Society*. 2003, pp. 385-392.
- [31] MIRAOU, I. et al. High-power laser cutting of steel plates: heat affected zone analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 2016, pp. 1-8. ISSN 1687-8434.

- [32] YILBAS, B.S. et al. Laser cutting of alumina tiles: heating and stress analysis. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013, vol. 15, pp. 14-24. ISSN 1526-6125.
- [33] JIA, X., ZHAO, X. Numerical study of material decomposition in ultrafast laser interaction with metals. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 463, pp. 781-790. ISSN 0169-4332.
- [34] MINAŘÍK, V. Tepelné dělení materiálu. 1.vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 50s. ISBN 80-01-01028-7.
- [35] KUBÍČEK, J. et al. Technologie svařování a zařízení. 2. vyd. Ostrava: ZERROS, 2001. 395s., ISBN 80-85771-81-0.
- [36] HÍREŠ O. et al. Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom. 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [37] HASHISH, M. In Memoriam – Dr. Norman Charles Franz. *Water Jet Technology Association*. 2007, pp. 2.
- [38] MILLER, R. Waterjet cutting: Technology and industrial applications. *The Fairmont Press*. 1991. 154 s. ISBN 0-88173-068-8.
- [39] MADADNIA, J. et al. A Study of Cavitation Induced Surface Erosion in Abrasive Waterjet Cutting Systems. *Advanced Materials Research*. 2008, vol. 53–54.
- [40] ODEHNAL, O. Řezání vodním paprskem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 59 s
- [41] HLOCH, S.et. al., Abrasive type influence on surface roughness at abrasive waterjet cutting. *Machines, technologies, materials: International virtual journal for science, technics and innovations for the industry*. 2008, no. 10-11, ISSN 1313-0226.
- [42] KULEKCI, M. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. vol. 22, pp. 1297-1306, ISSN 0890-6955.
- [43] HLAVÁČ, L., et al. Prevence koroze kovů po obrábění kapalinovým paprskem. *Sborník referátů konference AKI 2003*, Praha: Asociace korozních inženýrů, 2003.
- [44] ELMAN, J. Electrical discharge machining. Dearborn, USA: *Society of Manufacturing Engineers*, 2001
- [45] MCGEOUGH, J. A. Advanced methods of machining. *New York: Chapman and Hall*, 1988. ISBN 0412319705.
- [46] VANDERAUWERA, W. Development of proces planning tools for EDM operations. Gent, 2017. Katholieke Universiteit Leuven.
- [47] KUDĚLKA V. et. al., Vliv zbarvených pásem kolem svarů na vlastnosti svaru i jeho tepelně ovlivněné oblasti. *Česká svářečská společnost ANB*. 2017.

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA**Publikace evidované v databázi Web of Science (12)**

- [1] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. The High Density Polyethylene Composite with Recycled Radiation Cross-Linked Filler of rHDPE. *Polymers*. 2018, vol. 10, iss. 12, pp. 1-13. ISSN 2073-4360.
- [2] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. The Electrical, Mechanical and Surface Properties of Thermoplastic Polyester Elastomer Modified by Electron Beta Radiation. *Polymers*. 2018, vol. 10, iss. 12, pp. 1-14. ISSN 2073-4360.
- [3] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Effect of Beta Irradiation on mechanical Properties of Surface Layer of Injection Moulded Polyamide 11. *KGK – Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2018, vol. 71, iss. 5, pp. 30-33. ISSN 0948-3276.
- [4] MANAS, David et al. Mechanical Properties Changes of Irradiated Thermoplastic Elastomer. *Polymers*. 2018, vol. 10, iss. 1, pp. 1-14. ISSN 2073-4360.
- [5] **STOKLASEK, Pavel**, **STOKLASEK, Pavel** et al. Local mechanical properties of irradiated cross-linked filled poly (butylene terephthalate) (PBT). *Materiali in Tehnologije*. 2018, vol. 52, iss. 1, pp. 35-37. ISSN 1580-2949.
- [6] ZAPLETALOVA, Andrea, **STOKLASEK, Pavel** et al. Objective measurements of skin surface roughness after microdermabrasion treatment. *Skin Research and Technology*. 2017, vol. 23, iss. 3, pp. 346-353. ISSN 0909-752X.
- [7] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Micro-hardness of surface layer of irradiated Polybutene Terephthalate (PBT). *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016)*. 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [8] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Mechanical properties and temperature stability of modified polybutylene terephthalate by beta rays. *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016)*. 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [9] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Mechanical properties change of thermoplastic elastomer after using of different dosage of irradiation by beta rays. *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016)*. 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [10] **STOKLASEK, Pavel** et al. Improvement of handle grip using reverse engineering, CAE and Rapid Prototyping. *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016)*. 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [11] **STOKLASEK, Pavel** et al. Mechanical properties of modified HDPE by ionizing radiation after temperature load under and above the pure HDPE melting temperature. *Advances in Intelligent Systems Research (International*

Conference on Innovative Material Science and Technology 2016, IMST 2016; Shenzhen; China; 19 August 2016 through 21 August 2016). 2016, vol. 139, pp. 416-420. ISSN 1951-6851.

- [12] PALOUSEK, David et al. Pilot study of the wrist orthosis design process. *Rapid Prototyping Journal*. 2014, vol. 20, iss. 1, pp. 27-32. ISSN 1355-2546.

Publikace evidované v databázi SCOPUS (11):

- [1] **STOKLASEK, Pavel** et al. Case study research: Optical digitization, reverse engineering and rapid prototyping as a solution in pedal car development process. *MATEC Web of Conferences (22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2018; Majorca; Spain; 14 July 2018 through 17 July 2018)*. 2018, vol. 210, pp. 1-5. ISSN 2261-236X.
- [2] **STOKLASEK, Pavel** et al. Flexural behaviour of ABS 3D printed parts on professional printer Stratasys Fortus 900mc. *MATEC Web of Conferences (22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2018; Majorca; Spain; 14 July 2018 through 17 July 2018)*. 2018, vol. 210, pp. 1-5. ISSN 2261-236X.
- [3] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Impact resistance study of high-density polyethylene through drop-weight and tensile impact tests. *Materials Science Forum*. 2018, vol. 919, pp. 246-253. ISSN 0255-5476.
- [4] KLIMA, Ondrej, **STOKLASEK, Pavel** et al. Virtual 2D-3D Fracture Reduction with Bone Length Recovery Using Statistical Shape Models. *Lecture Notes in Computer Science (International Workshop on Shape in Medical Imaging, ShapeMI 2018 held in conjunction with 21st International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, MICCAI 2018; Granada; Spain; 20 September 2018 through 20 September 2018)*. 2018, vol. 11167, pp. 207-219. ISSN 0302-9743.
- [5] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Thermal properties of irradiated duramid with 45 % of glass fibre by beta rays. *MM Science Journal*. 2017, vol. 2017, iss. 12, pp. 1986-1989. ISSN 1803-1269.
- [6] **STOKLASEK, Pavel** et al. Influence of beta rays on polypropylene. *MM Science Journal*. 2017, vol. 2017, iss. 12, pp. 1937-1941. ISSN 1803-1269.
- [7] **STOKLASEK, Pavel** et al. Influence of beta rays on nylon 6 mechanical properties. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 756, pp. 27-34. ISSN 1013-9826.
- [8] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Physical properties of polyamide 11 after radiation cross-linking by accelerated electrons. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 756, pp. 19-26. ISSN 1013-9826.
- [9] **STOKLASEK, Pavel** et al. Cross-linked low density polyethylene mechanical properties after temperature load at 110, 180 and 220 °C. *MM Science Journal*. 2016, vol. 2016, iss. 10, pp. 1105-1109. ISSN 1803-1269.

- [10] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Evaluation of mechanical properties of surface layer injection molded polypropylene by nanoindentation test. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 699, pp. 86-90. ISSN 1013-9826.
- [11] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Effect of high doses beta irradiation on the micromechanical properties of surface layer of glass-filled polypropylene. *Key Engineering Materials*. 2015, vol. 662, pp. 185-188. ISSN 1013-9826.

Ostatní publikace (2):

- [1] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. New apparatus for Chip-Chunk resistance testing. *Elastomery*. 2017, vol. 21, iss. 3, pp. 167-172. ISSN 1427-3519.
- [2] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Chip-chunk resistance tests. *Tire Technology International*. 2017, vol. December 2017, pp. 104-108. ISSN 1462-4729.

Patenty, užité a průmyslové vzory (9):

- [1] **STOKLASEK, Pavel** et al. Způsob polohování tluku ručního poklepového nástroje a poklepový nástroj k jeho provádění. *Patent číslo 307307 udělený* 11. 4. 2018.
- [2] **STOKLASEK, Pavel** et al. Ruční poklepový nástroj s výměnným a otočným tlukem. *Užitný vzor číslo 30782 udělený* 20. 6. 2017.
- [3] **STOKLASEK, Pavel** et al. Způsob výroby krycí masky k překrytí neupravených částí výrobků. *Patent číslo 306604 udělený* 8. 2. 2017.
- [4] **STOKLASEK, Pavel** et al. Poklepový nástroj s výměnnou funkční částí. *Patent číslo 306083 udělený* 15. 6. 2016.
- [5] MALOCH, Jaroslav, **STOKLASEK, Pavel** et al. Způsob snímání průběhu deformací při rázových testech a zařízení k provádění tohoto způsobu. *Patent číslo 305946 udělený* 30. 3. 2016.
- [6] **STOKLASEK, Pavel** et al. Poklepový nástroj s výměnnou funkční částí. *Užitný vzor číslo 28539 udělený* 11. 8. 2015.
- [7] **STOKLASEK, Pavel** et al. Kladiva a jiná podobná nářadí a nástroje. *Průmyslový vzor číslo 002712968-0002 udělený* 10. 6. 2015.
- [8] **STOKLASEK, Pavel** et al. Kladiva a jiná podobná nářadí a nástroje. *Průmyslový vzor číslo 002712968-0001 udělený* 10. 6. 2015.
- [9] MANAS, Miroslav et al. Ruční nástroj. *Průmyslový vzor číslo 002570630-0001 udělený* 4. 11. 2014.

CV AUTORA

Jméno a příjmení, titul Pavel Stoklásek, Ing.
Datum a místo narození 8. leden 1989, Zlín
Adresa Křiby 4720, 760 05 Zlín
Česká republika
Telefon +420 777 241 286
E-mail pstoklasek@utb.cz
Státní příslušnost česká

Vzdělání:

7/2014 – dosud UTB ve Zlíně
Fakulta technologická
doktorský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Nástroje a Procesy

7/2008 – 6/2013 Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
studijní program: Konstrukční inženýrství
studijní obor: Strojní inženýrství

9/2004 – 6/2008 Střední průmyslová škola Zlín
obor: Strojírenství
zaměření: Počítačová grafika

Pracovní zkušenosti:

10/2013 – dosud UTB ve Zlíně, CEBIA-TECH
Výzkumný projektový pracovník projektu CEBIA-Tech

Vedení cvičení v předmětech:

A1UMV/AQUMV – Úvod do materiálových věd

Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D.

Vliv technologie dělení materiálů na jejich povrchové vlastnosti

Influence of the material cutting technology on their surface properties

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2019

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7454-851-2

